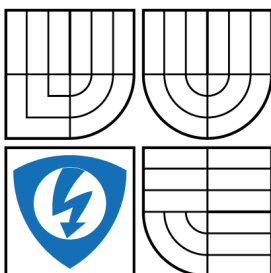


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# **LOKALIZACE PRO BEZDRÁTOVÉ SÍŤ MALÉHO DOSAHU**

LOCALIZATION IN WIRELESS PAN

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**ZBYSZEK POLOK**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ONDŘEJ HYNČICA**

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav automatizace a měřicí techniky**

# **Bakalářská práce**

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Zbyszek Polok

**ID:** 125600

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2012/2013

## **NÁZEV TÉMATU:**

**Lokalizace pro bezdrátové sítě malého dosahu**

## **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s problematikou lokalizace v bezdrátových senzorových sítích. Seznamte se s komunikačním standardem IEEE 802.15.4. Navrhněte a připravte experimenty pro lokalizaci. Zvolte vhodný algoritmus lokalizace pohyblivého uzlu a otestujte jeho vlastnosti.

## **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] STALLINGS William. Wireless Communications & Networks. 2.vyd. Upper Saddle River (NJ): Pearson Prentice Hall, 2005. ISBN 0-13-191835-4.
- [2] Zhetao Li, Renfa Li, Yehua Wei and Tingrui Pei, 2010. Survey of Localization Techniques in Wireless Sensor Networks. Information Technology Journal, 9: 1754-1757.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 27.5.2013

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Hynčica

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

## **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá problematikou lokalizace v bezdrátové senzorové síti. Pomocí modulů Zigbit 900 s čipem pro bezdrátovou komunikaci AT86RF212 je měřena síla signálu v prostorách VUT v Brně. Naměřené hodnoty jsou zpracovány lokalizačními technikami trilaterace a eukleidovské propagační metody. Po zjištění negativních vlivů na výpočet hledané pozice je navržena filtrační metoda vypočítaných hodnot. Pro lokalizaci všech hledaných pozic je také vytvořen algoritmus určující dostatečný počet referenčních hodnot ztrátovosti. Pomocí těchto algoritmů je optimalizována lokalizační metoda trilaterace.

## **Klíčová slova**

Bezdrátové senzorové sítě, WSN, IEEE 802.15.4, RSSI, měření vzdálenosti, lokalizace, trilaterace, Zigbit

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the problem of localization in wireless sensor network. First, ZigBit 900 Modules equipped with chip for wireless communication (AT86RF212) are used to measure the signal strength in the area of Brno University of Technology. The recorded values are then processed using trilateration localization techniques and Euclidean propagation methods. After detecting negative effects on the calculation of the position sought, a filtering method for the calculated values is proposed. In addition, an algorithm determining a sufficient number of reference values for loss rate is also designed to locate all the positions sought. By virtue of these algorithms the trilateration localization method is optimized.

## **Keywords**

Wireless sensor network, WSN, IEEE 802.15.4, RSSI, distance measurement, localization, trilateration, Zigbit

### **Bibliografická citace:**

POLOK, Z. *Lokalizace pro bezdrátové sítě malého dosahu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 43s.  
Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Ondřej Hynčica.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Lokalizace pro bezdrátové sítě malého dosahu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: **27. května 2013**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřejovi Hynčicovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **27. května 2013**

.....  
podpis autora

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1 ÚVOD.....  | 8  |
| 2 BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ.....                           | 9  |
| 2.1 Požadavky kladené na WSN.....                          | 9  |
| 3 STANDARD IEEE 802.15.4.....                              | 10 |
| 3.1 Komunikační pásma.....                                 | 10 |
| 3.2 Typy síťových uzlů.....                                | 11 |
| 3.3 Topologie sítě.....                                    | 11 |
| 4 LOKALIZAČNÍ ALGORITMY.....                               | 12 |
| 4.1 Range-free metody.....                                 | 12 |
| 4.1.1 APIT algoritmus.....                                 | 12 |
| 4.1.2 DV-Hop algoritmus.....                               | 13 |
| 4.2 Range-based algoritmy.....                             | 14 |
| 4.2.1 Eukleidovská propagační metoda.....                  | 14 |
| 4.2.2 DV-Distance algoritmus.....                          | 15 |
| 4.2.3 Trilaterace.....                                     | 15 |
| 5 INDIKÁTOR VÝKONU PŘIJATÉHO SIGNÁLU RSSI.....             | 17 |
| 5.1 Friisova rovnice.....                                  | 17 |
| 5.2 Index ztrátovosti prostředí.....                       | 18 |
| 5.3 Zdroje chyb.....                                       | 19 |
| 6 MODUL ZIGBIT900.....                                     | 20 |
| 7 EXPERIMENTY.....   | 21 |
| 7.1 Použité přístroje.....                                 | 21 |
| 7.2 Postup měření na Kolejní 4.....                        | 21 |
| 7.2.1 Volba výstupního výkonu.....                         | 22 |
| 7.2.2 Určení ztrátovosti prostředí.....                    | 23 |
| 7.3 Lokalizace pomocí trilaterace.....                     | 23 |
| 7.4 Lokalizace pomocí eukleidovské propagační metody.....  | 25 |
| 7.5 Lokalizace pomocí trilaterace se zónovou filtrací..... | 25 |
| 7.5.1 Algoritmus pro vytvoření filtračních zón.....        | 25 |
| 7.5.2 Ukázka filtračních zón.....                          | 27 |
| 7.6 Výsledky filtrace trilaterační metody.....             | 28 |
| 7.7 Porovnání použitých metod.....                         | 28 |
| 7.8 Porovnání použitých antén.....                         | 30 |
| 7.9 Postup měření na Technické 12.....                     | 31 |
| 7.9.1 Určení ztrátovosti prostředí a filtračních zón.....  | 32 |
| 7.9.2 Výsledky měření na Technické 12.....                 | 35 |
| 8 ZÁVĚR.....   | 39 |

# 1 ÚVOD

V dnešní době se zvyšuje zájem o lokalizaci v budovách. Existuje mnoho komerčně dostupných lokalizačních zařízení využívající globální navigační systémy, ale ty jsou v budovách nepoužitelné, a proto se využívají bezdrátové senzorové sítě. Aplikací lokalizačního algoritmu a adekvátním rozmístěním uzlů, můžeme s dostatečnou přesností lokalizovat i pohyblivé osoby či předměty.

Bakalářskou práci, lze rozdělit na dvě části, teoretickou a praktickou. Cílem teoretické části této práce je seznámit se s problematikou lokalizačních technik v bezdrátových senzorových sítích a se standardem IEEE 802.15.4.

Praktická část projektu se zabývá aplikací lokalizačních algoritmů, založených na měření síly přijatého signálu. Měření bude probíhat v prostorách VUT v Brně na Kolejní 4 a na Technické 12 na zapůjčených modulech Zigbit 900 s čipem pro bezdrátovou komunikaci AT86RF212 společnosti Atmel. Pro zpracování naměřených hodnot budou vytvořeny lokalizační metody v programu Matlab a navrženy vlastní řešení optimalizace lokalizační metody trilaterace.

Během experimentu se rozmístí ve známém prostředí kotevní uzly. Poté pomocí jednoho pohyblivého uzlu se změří sílu přijatého signálu všech rozmístěných kotevních uzlů v různých částech objektu. Z naměřených dat se určí vlastnosti prostředí a vypočítá index ztrátivosti prostředí. Následně bude možno stanovit jednotlivé vzdálenosti mezi pohyblivým a kotevními uzly. Dosazením těchto vzdáleností do lokalizačních algoritmů se vypočítají hledané pozice. Nakonec bude ještě potřeba odfiltrovat chybně nalezené pozice.



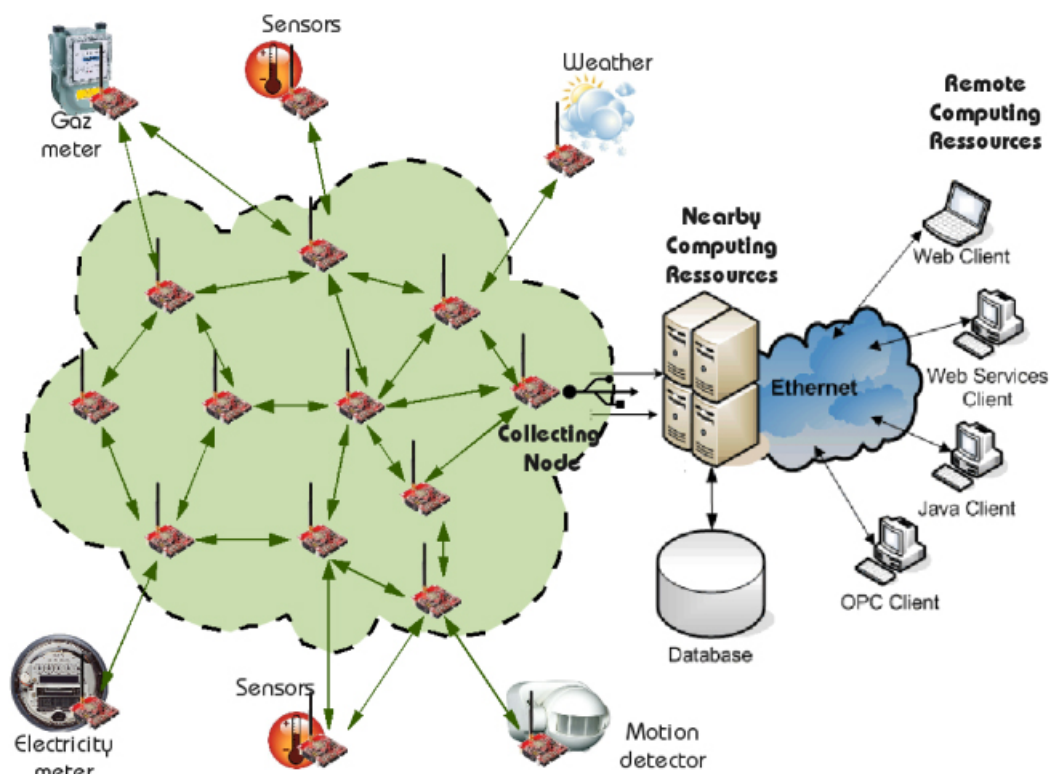
## 2 BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

Bezdrátové senzorové sítě, zkráceně WSN (Wireless Sensor Network), jsou sítě tvořeny z mnoha malých zařízení rozmístěných v určité oblasti. Základním prvkem sítě je uzel vybavený snímačem monitorujícím změnu daných jevů, takové jak teplota, vlhkost, přítomnost objektu, zvuk, tlak, pohyb atd. WSN jsou sítě, které se zaměřují hlavně na minimální energetickou náročnost. Typický uzel WSN je sestaven z vysílače, přijímače, paměti, mikroprocesoru, senzoru a baterie.

### 2.1 Požadavky kladené na WSN

Nejdůležitějšími parametry, kterými se liší mezi sebou senzorové sítě a kterými se odlišují od jiných sítí jsou:

- malé rozměry uzlů
- omezení výpočetního výkonu a paměti pro další minimalizaci spotřeby energie
- podpora bezpečného přenosu dat a ochrana před chybami přenosu
- nízké pořizovací náklady
- významný důraz na rychlost přenosu informací (zejména v sítích určených pro varování před nebezpečím)
- minimální nebo žádný lidský zásah v udržování sítě
- jednorázovost – po vybití baterie nebo poškození uzlu se často vymění za nový
- volné kmitočtové pásmo (nelicencované)

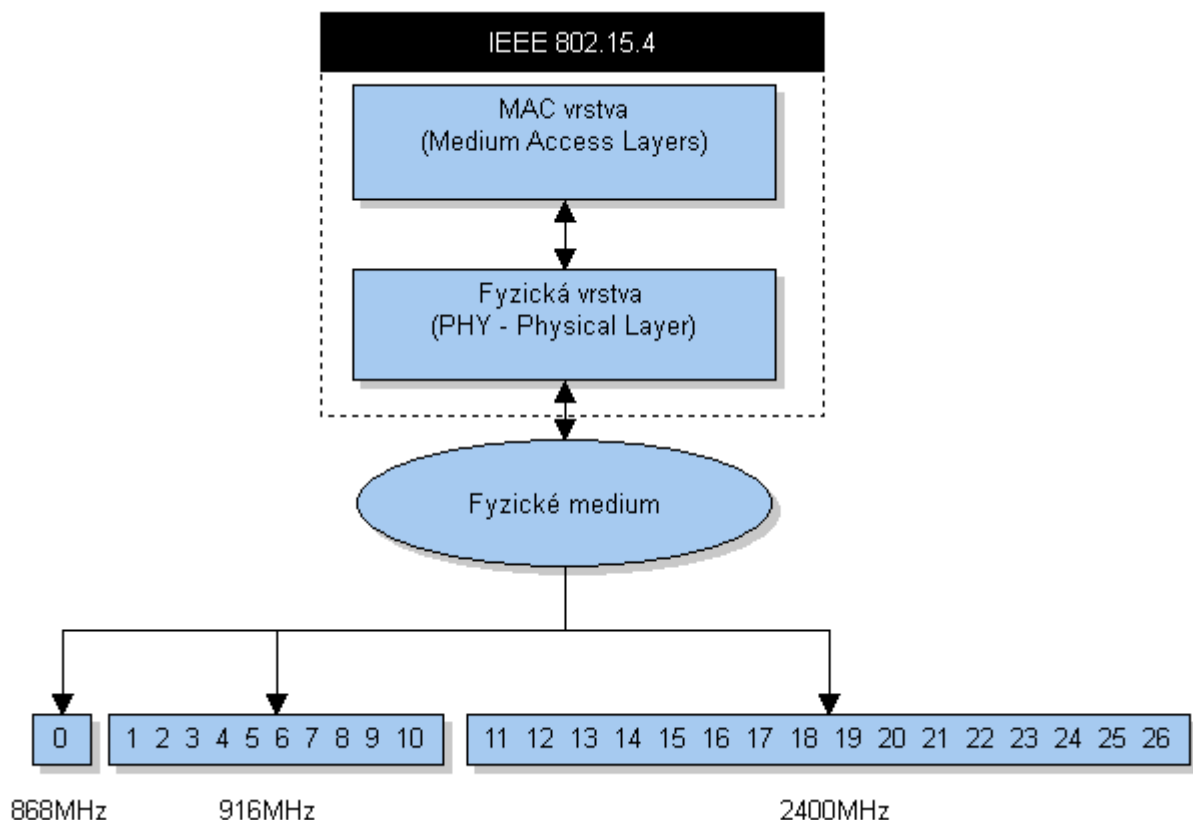


Obrázek 2.1 Klasické rozmístění WSN. [1]

### 3 STANDARD IEEE 802.15.4

Standard 802.15.4 byl zveřejněn v roce 2003. Byl vytvořen pro nízko nákladové a nízko rychlostní aplikace. Stal se nejpoužívanějším standardem bezdrátových senzorových sítí. Definiuje pouze vrstvu MAC a fyzickou vrstvu (PHY).

- MAC vrstva – je to subvrstva vrstvy spojovací, která zajišťuje fyzické adresování a řízení přístupu k médiu.
- PHY vrstva - zajišťuje převod proudu bitů na signál a opačný převod ze signálu na proud bitů.



**Obrázek 3.1** Blokové schéma 802.15.4

#### 3.1 Komunikační pásma

Standard komunikuje v pásmech ISM (Industrial, Scientific, Medical), která jsou dostupná bez licenčních poplatků, avšak bez garance proti rušení. IEEE 802.15.4 využívá oblasti 868, 915 a 2450 MHz. Pásma 868 a 915 MHz jsou vhodná pro větší členité plochy, protože mají lepší penetraci signálu přes překážky. Pro pásmo 2450 MHz je předností dosahovaná rychlost přenosu.

## 3.2 Typy síťových uzlů

Standard 802.15.4 definuje dva typy síťových uzlů a to:

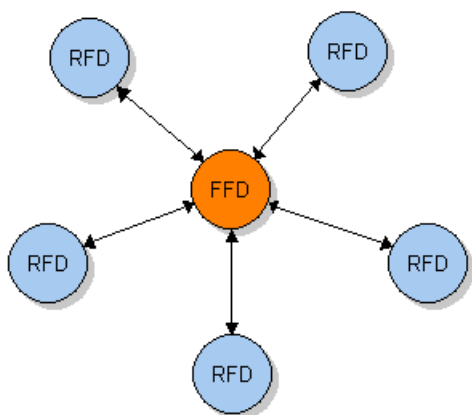
- FFD (Fully Functionality Devices) – zařízení s úplnou funkcionalitou
- RFD (Reduced Functionality Devices) – zařízení obsahující limitované funkce a možnosti

Uzly RFD mohou komunikovat pouze s uzly s úplnou funkčností. Pro tyto zařízení jsou požadavky na systémové zdroje mnohem nižší než pro FFD, a proto jsou také levnější. Další výhodou je malá energetická spotřeba. RFD zařízení se používají jako koncové stanice.

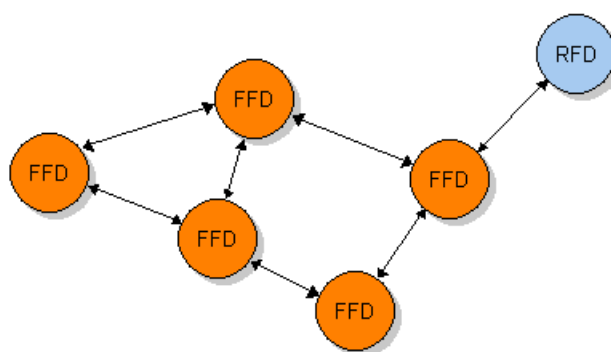
Zařízení FFD oproti RFD využívají všechny funkce a možnosti standardu 802.15.4. Mohou komunikovat s RFD i FFD. Používají se také síťové koordinátory. Koordinátor je centrální síťový prvek, který řídí komunikaci celé sítě. Takový prvek je v síti pouze jeden a jmenuje se PAN koordinátor. Nevýhodou zařízení FFD jsou větší nároky na výpočetní výkon a s ním spojená pořizovací cena a energetická náročnost, která pro bezdrátové senzorové sítě je klíčovým prvkem.

## 3.3 Topologie sítě

Standard umožňuje využít síťovou topologii typu bod-bod (peer-to-peer, P2P) a typu hvězda. U síťové topologie typu hvězda se všechny uzly připojují pouze k jednomu centrálnímu uzlu. Nevýhodou tohoto zapojení je, velikost rozlohy limitovaná jedním skokem. Metodu bod-bod se často používá na oblasti s velkou rozlohou nebo na členité plochy.



Obrázek 3.1 Hvězdicová topologie



Obrázek 3.2 Topologie bod-bod (P2P)

## 4 LOKALIZAČNÍ ALGORITMY

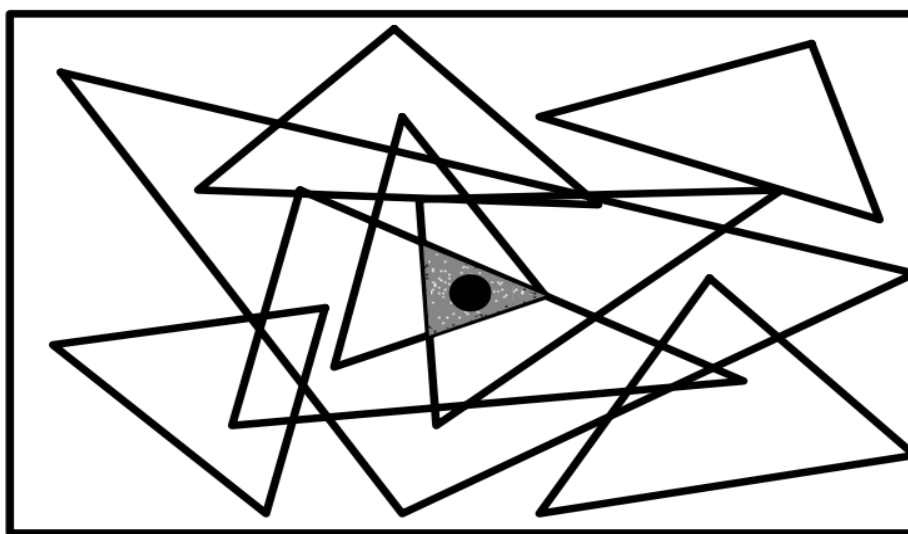
Tato práce se zabývá lokalizačními metodami založenými na měření síly přijatého signálu, ale existují i jiné metody, které se opírají o různé fyzikální vlastnosti a výpočetní algoritmy. Tyto metody lze rozdělit na dvě základní skupiny. Range-free metody, které nepotřebují pro svoji funkčnost znát přesnou vzdálenost mezi svými uzly. Na rozdíl od metod range-based, které jsou závislé na určení vzdálenosti mezi jednotlivými uzly. Dále můžeme algoritmy rozdělit na algoritmy s kotevními uzly a bez kotevních uzlů. Kotevní uzel je uzel, který zná svoji polohu.

### 4.1 Range-free metody

Algoritmy pracující s odhadovanou vzdáleností. Nepotřebují přesnou vzdálenost okolních uzlů. Mezi nejznámější algoritmy patří metoda APIT (Approximate Point In Triangle)[6] a DV-Hop (Distance Vector Hop)[7]. Obě tyto metody využívají kotevní uzly.

#### 4.1.1 APIT algoritmus

Je založený na myšlence, že uzly, které znají svoji polohu, se překrývají z dosahem uzlů s neznámou polohou. Uzly s neznámou polohou si určí tři kotevní uzly a stanoví zda se nacházejí uvnitř nebo mimo zvolený trojúhelník, vytvořeným kotevními uzly. Operaci zopakuje pro všechny možné kombinace kotevních uzlů. Všechny tyto trojúhelníky, obsahující uzel s neznámou pozicí, vymezují oblast možného výskytu hledaného uzlu. Následně si uzel vypočítá střed této oblasti.



Obrázek 4.1 Princip algoritmu APIT [6]

### 4.1.2 DV-Hop algoritmus

Pro tento algoritmus musí znát každý uzel počet skoků, potřebných pro překonání vzdálenosti ke kotevnímu uzlu. Ze vzdálenosti mezi kotevními uzly a počtem skoků mezi nimi, algoritmus odhadne průměrnou vzdálenost jednoho skoku mezi uzly. Pro správný výpočet neznáme pozice je ještě potřeba, vypočítat korekci. Korekci lze vypočítat ze vztahu (4.1) [7].

$$c_i = \frac{\sum \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{\sum h_i}, i \neq j \quad [m] \quad (4.1)$$

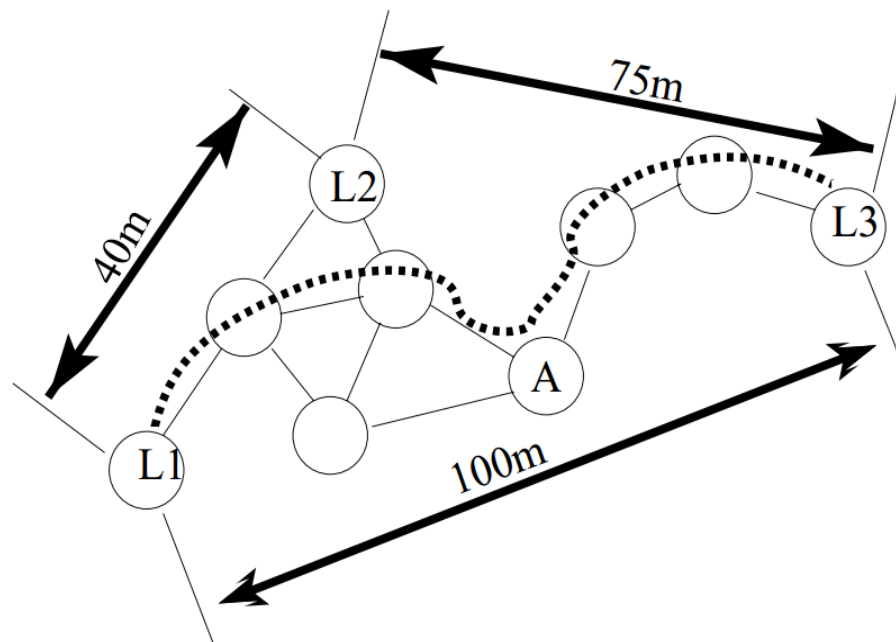
$c_i$  – korekce kotevního uzlu  $i$

$X_i, Y_i$  – souřadnice kotevního uzlu  $i$

$X_j, Y_j$  – souřadnice ostatních kotevních uzlů

$h_i$  – počet skoků k ostatním kotevním uzlům

Neznámý uzel (A) se potom může vypočítat pomocí trilaterace (4.2) od jednotlivých kotevních uzlů (L1, L2, L3) s využitím korekce nejbližšího kotevního uzlu ( $c_i$ ) a počtu skoků k neznámému uzlu ( $h_A$ ), jak lze vidět na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 Princip algoritmu DV-Hop [7]

Výhodou tohoto algoritmu je, že není ovlivňován chybou během měření vzdálenosti metodou RSSI, ale pro použití je nutné, aby uzly byly ve stejné vzdálenosti od sebe.

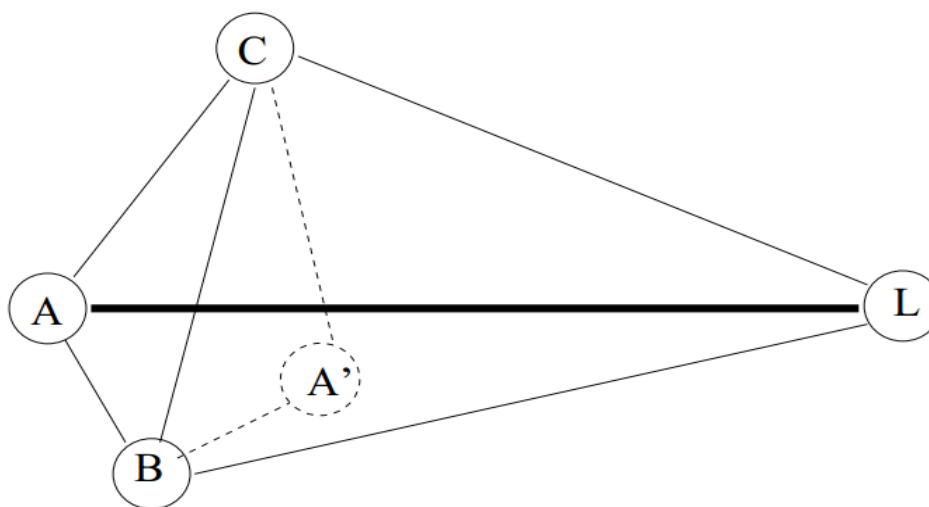
## 4.2 Range-based algoritmy

Algoritmy založené na speciálním hardwaru senzorového uzlu a schopnosti určit vzdálenost k ostatním uzlům. Mezi nejčastější techniky patří:

- **TDoA** (Time Difference of Arrival) – výpočet vzdálenosti založený na rozdílu mezi rychlostí šíření rádiového a ultrazvukového impulzu. Vysílač vypustí současně tyto impulzy a přijímač při příchodu rádiového impulzu spustí časovač a počítá zpoždění ultrazvukového impulzu. Ze změřeného času se vypočte vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem.
- **ToA** (Time of Arrival) – metoda počítající s dobou, za kterou překoná cestu signálu od vysílače k přijímači. Poměr rychlosti světla ve vakuu a časového signálu nosné frekvence je měřítkem vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem.
- **RSSI** – měření síly přijatého signálu. Podrobně popsáno v kapitole 5.
- **AoA** (Angle of Arrival) – měření vzdálenosti pomocí směrových antén, které určují vzdálenost na základě úhlu dopadu signálu od vysílače. Technika využívaná v letectví. Velká náchylnost na odrazy od okolních překážek.

### 4.2.1 Eukleidovská propagační metoda

Další metoda využívající kotevní uzly a následovnou trilateraci blíže popsanou v následující části textu. Je také velmi podobná k v dnešní době využívané metodě GPS. Neznámou polohu uzlu (A) lze vypočítat z naměřených hodnot  $|AC|$  a  $|AB|$ , vzdálenost  $|BC|$  je známa. Tyto uzly tvoří čtyřúhelník s kotevním uzlem (L). Pomocí základní trigonometrie se spočítá vzdálenost  $|AL|$  a výslednou neznámou polohu uzlu (A). Předností této metody je, že pro výpočet neznámé polohy stačí, aby byla v dosahu dvou uzlů se známou polohou, a třetí kotevní uzel se dopočítá. Může ovšem dojít k zrcadlení (A'), které je zobrazeno na obrázku 4.3. Pro upřesnění neznámé pozice je tedy nutné najít dalšího souseda pro ověření [7].



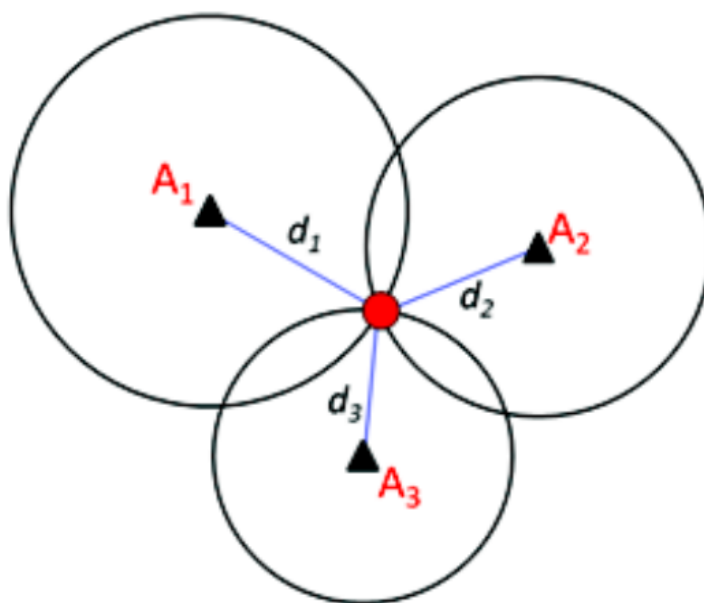
Obrázek 4.3 Eukleidovská propagační metoda [7]

### 4.2.2 DV-Distance algoritmus

Známa metoda ze skupiny range-based z použitím kotevních uzlů. Je velmi podobná metodě DV-Hop, ale místo skoků, počítá s danou vzdáleností mezi uzly. Vzdálenost se určí z RSSI. Díky tomu je také mnohem přesnější. Nevýhodou této metody je náchylnost na chybovost při používání RSSI.

### 4.2.3 Trilaterace

Poslední ze známých a často využívaných metod je trilaterace. V některých literaturách se můžeme setkat z označením triangulace. Pro výpočet neznáme pozice je nezbytné, aby neznámý uzel byl v dosahu nejméně tří kotevních uzlů pro 2D a nejméně v dosahu čtyř kotevních uzlů pro 3D lokalizaci. Pro lokalizaci pomocí více kotevních uzlů v jednom kroku se používá označení multilaterace. S využitím kružnic o středu v kotevních uzlech ( $A_1, A_2, A_3$ ), které reprezentují dosah vysílačů, zobrazené na obrázku 4.4. lze vypočítat neznámou pozici [8].



Obrázek 4.4 Princip určení neznáme pozice pomocí trilaterace [8]

Po dosazení do rovnic (4.2) v kartézském souřadném systému, jsme schopní úpravami z těchto rovnic dostat neznámou pozici hledaného uzlu.

$$\begin{aligned}(x-x_1)^2+(y-y_1)^2 &= d_1^2 \\(x-x_2)^2+(y-y_2)^2 &= d_2^2 \\&\vdots \\(x-x_n)^2+(y-y_n)^2 &= d_n^2\end{aligned}\tag{4.2}$$

$x, y$  – souřadnice hledaného uzlu

$x_n, y_n$  – souřadnice kotevních uzlů

$d_n$  – vzdálenosti mezi kotevními uzly a hledanou pozicí

Úpravami rovnic (4.2) dostaneme matice  $A$  (4.3) a  $B$  (4.4). Pomocí těchto matic můžeme vypočítat hledanou pozici uzlu  $p$  (4.5).

$$A = -2 \cdot \begin{bmatrix} x_1 - x_n & y_1 - y_n \\ x_2 - x_n & y_2 - y_n \\ \vdots & \vdots \\ x_{n-1} - x_n & y_{n-1} - y_n \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_n^2) - (x_1^2 + x_n^2) - (y_1^2 + y_n^2) \\ (d_2^2 - d_n^2) - (x_2^2 + x_n^2) - (y_2^2 + y_n^2) \\ \vdots \\ (d_{n-1}^2 - d_n^2) - (x_{n-1}^2 + x_n^2) - (y_{n-1}^2 + y_n^2) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Takto upravená soustava rovnic, je ve výsledku násobení matic (4.6).

$$A \cdot p = B \quad (4.6)$$

Metoda trilaterace je jednou z přesnějších metod určování vzdálenosti, na rozdíl od metod DV-Hop či APIT. Jenže metoda je velmi náchylná na nepřesnost parametru RSSI, který je ovlivnitelný mnoha faktory.

Předností trilaterace je nenáročnost. Malý počet přenesených paketů v WSN, jelikož je počet skoků omezen na jedna, malé nároky na výpočetní výkon hardwaru. Pakety jsou vysílány v určitých intervalech, které lze libovolně nastavit.

Multilaterace probíhá úplně stejně až na počet kotevních uzlů, použitých pro výpočet hledané pozice.

Mnoho metod využívá trilateraci jako poslední krok výpočtu.



## 5 INDIKÁTOR VÝKONU PŘIJATÉHO SIGNÁLU RSSI

Zařízení WSN nejsou vhodná pro lokalizaci s velkou přesností. Místo toho je lze aplikovat na sledování pohybu osob v budově neboli všude tam, kde není vyžadována přesnost. Základem určování vzdálenosti pomocí vysílání signálu z uzlu s neznámou polohou, který je přijímán uzly se známou polohou. Změřené hodnoty vyhodnotí vhodný algoritmus, který vypočítá přibližnou polohu uzlu. Každá metoda dosahuje danou přesnost a je vhodná pro určité kritéria.

Techniky založené na měření parametru RSSI jsou oblíbené s ohledu na jednoduchost a minimální hardwarové nároky. Pokud je správně určená ztrátovost prostředí, lze aplikovat vztah mezi silou přijatého signálu a vzdálenosti. Pro měření pomocí RSSI není nutná žádná další hardwarová úprava. Po naměření výkonu přijatého signálu je proveden převod do indikátoru výkonu přijatého signálu (RSSI). Přesnost komerčně dostupných zařízení se pohybuje do  $\pm 4$  dBm. Tato poměrně velká chyba ovlivňuje vypočtenou hodnotu vzdálenosti. Další nepřesnost je způsobená dynamickými změnami vlastností prostředí. Z toho důvodu hodnota RSSI je velmi proměnná. Během vysílání dochází také k izotropnímu rozcházení signálu, protože dochází k interferenci a kontaktu s překážkami, a proto se tato technika musí nakalibrovat na prostředí, v kterém se zrovna nachází. Jestli jsou v prostředí provedeny změny, musí se opět provést kalibraci.

### 5.1 Friisova rovnice

Výpočet vzdálenosti na základě síly přijatého signálu je založený na Friisově rovnici, která v ideálních podmínkách znázorňuje funkci přijaté energie na vysílaném výkonu a vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem (5.1) [4]. Rovnice byla odvozena v roce 1945 Dánsko-americkým inženýrem Haraldem T. Friisem. Přijata energie proporcionálně klesá s kvadrátem vzdálenosti.

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \quad [mW] \quad (5.1)$$

$P_R$  – vysílaný výkon

$P_T$  – přijímaný výkon

$G_T$  – zisk antény vysílače

$G_R$  – zisk antény přijímače

$\lambda$  – vlnová délka

$d$  – vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

## 5.2 Index ztrátovosti prostředí

Pro popis rádiového prostředí se využívá rovnice (5.2). Z této rovnice lze vypočítat ztrátovosti prostředí [5].

$$\frac{P_R(d_0)}{P_R(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^\eta \quad (5.2)$$

$P_R(d_0)$  – síla přijatého signálu v referenční vzdálenosti  $d_0$  v jednotkách mW

$P_R(d)$  – síla přijatého signálu ve vzdálenosti  $d$  v jednotkách mW

$\eta$  – koeficient ztrátovosti okolního prostředí

$d$  – vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem

$d_0$  – referenční vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem

Hodnota indexu ztrátovosti prostředí se liší podle prostředí, v kterém probíhá měření. Úpravou rovnice (5.2) se získá vztah mezi hodnotou přijatého signálu a vzdáleností (5.4) a (5.5).

$$RSSI = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{0,001}\right) [dBm] \Rightarrow P = 10^{\left(\frac{RSSI-30}{10}\right)} [mW] \quad (5.3)$$

$$RSSI = RSSI_0 - 10 \cdot \eta \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) [dBm] \quad (5.4)$$

$$d = d_0 \cdot 10^{\left(\frac{RSSI_0 - RSSI}{10 \cdot \eta}\right)} [m] \quad (5.5)$$

Pro výpočet ztrátovosti prostředí se využívá rovnice (5.7), kterou získáme úpravou rovnice (5.6). Rovnice popisují vzájemný vztah mezi hodnotou přijatého výkonu  $P_R$ , vysílaného výkonu signálu  $P_T$ , vzdálenosti mezi těmito uzly a indexem ztrátovosti  $\eta$ .

$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^\eta [mW] \quad (5.6)$$

$$\eta = \frac{\log\left(\frac{P_R}{P_T}\right)}{\log\left(\frac{1}{d}\right)} [-] \quad (5.7)$$

Výpočet vzdálenosti nelze realizovat v reálném prostředí přímo pomocí Friisovy rovnice (5.1), protože signál je ovlivňován různými prvky nacházejícími se v komunikační cestě a okolí. Pro přesnější výsledky lze použít rovnici (5.5), která díky indexu ztrátovosti tyto nepříznivé elementy minimalizuje.

### 5.3 Zdroje chyb

Zdroje chyb v metodách RSSI vznikají během vyhodnocování naměřených hodnot.

- Nejčastěji při výběru nesprávných referenčních hodnot.
- Používáním nevhodné metody.
- Nedostačujícím počtem vzorků signálu.

Dále zde vystupují chyby způsobené nepřesností zařízení. Tyto chyby jsou důsledkem kompromisu mezi přesností a cenou.

- Na výstupu zařízení může být odchylka až  $\pm 3$  dBm oproti hodnotě nastavené.
- Vliv vyzařovací charakteristiky použité antény.
- Během kvantování energie přijatého signálu do formy RSSI vzniká další chyba zaokrouhlováním.

Největším zdrojem chyb, jak už bylo zmíněno, je ale prostředí a jeho vliv na šíření signálu.

## 6 MODUL ZIGBIT900

Praktická část této bakalářské práce byla prováděna na zapůjčených modulech Zigbit900 s čipem pro bezdrátovou komunikaci AT86RF212 společnosti Atmel. Modul se vyznačuje těmito parametry [9]:

- citlivost přijímače: -110 dBm
- maximální výstupní výkon: 10 dBm
- minimální výstupní výkon: -11 dBm
- frekvenční pásma: 700/800/900 MHz.

V případě použití rádiového čipu AT86RF212 je hodnota energie přijatého signálu (ED) určená osmi bitovým registrem PHY\_ED\_LEVEL s rozlišením 1dB. ED nabývá hodnotu v rozsahu 0 až 84, pro signál o velikosti 0 se považuje signál s výkonem menším než -100 dBm. Hodnotu přijatého výkonu lze spočítat pomocí rovnice (6.1) [9]. Přepočet přijaté energie je vždy určen výrobcem daného čipu.

$$P_R = \text{RSSI\_BASE\_VAL} + 1.03 \cdot \text{ED\_LEVEL} \quad [\text{dBm}] \quad (6.1)$$

$P_R$  – výkon přijatého signálu

$\text{RSSI\_BASE\_VAL}$  – minimální citlivost přijímače

$\text{ED\_LEVEL}$  – změřená hodnota uložená v registru PHY\_ED\_LEVEL

## 7 EXPERIMENTY

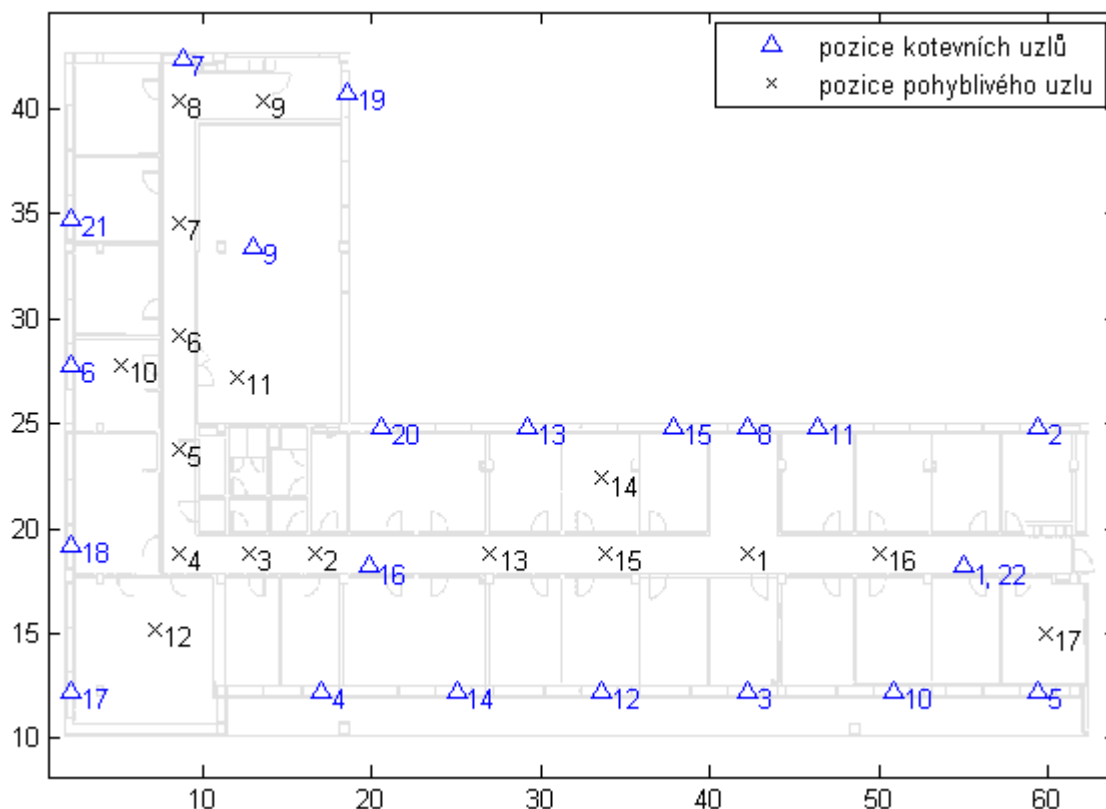
Úkolem experimentu bylo ověření vlastností lokalizace v bezdrátové senzorové síti. Tato bakalářská práce je zaměřená na metody využívající měření parametru RSSI. V prostorách VUT byly rozmístěny kotevní uzly a jeden pohyblivý uzel. První měření probíhalo v prostorách VUT na Kolejni 4 v pátém patře. Druhé měření bylo provedeno v nové budově VUT na Technické 12 v druhém patře bloku E.

### 7.1 Použité přístroje

- moduly Zigbit900
- měřicí program BDServis ver.78
- antény: ANT-868-JJB-ST, IQRF AN-01, ANT-8WHIP3H-SMA
- stativ
- notebook
- pro zpracování naměřených hodnot byl použit Matlab

### 7.2 Postup měření na Kolejni 4

Během měření bylo použito 22 kotevních uzlů a jeden pohyblivý. Kotevní uzly jsou znázorněny na obrázku 7.1 jako modré trojúhelníky. Byly umístěny na střed parapetních desek ve výšce zhruba 90 cm, kromě tří uzlů, které byly umístěny



Obrázek 7.1 Pozice pohyblivého a kotevních uzlů

na chodbě. Pohyblivý uzel je znázorněný jako černé „x“ a byl umístěn na stativ ve výšce 150 cm. Tento uzel naměřil hodnoty pro 17 pozic, které jsou také zobrazeny na obrázku.

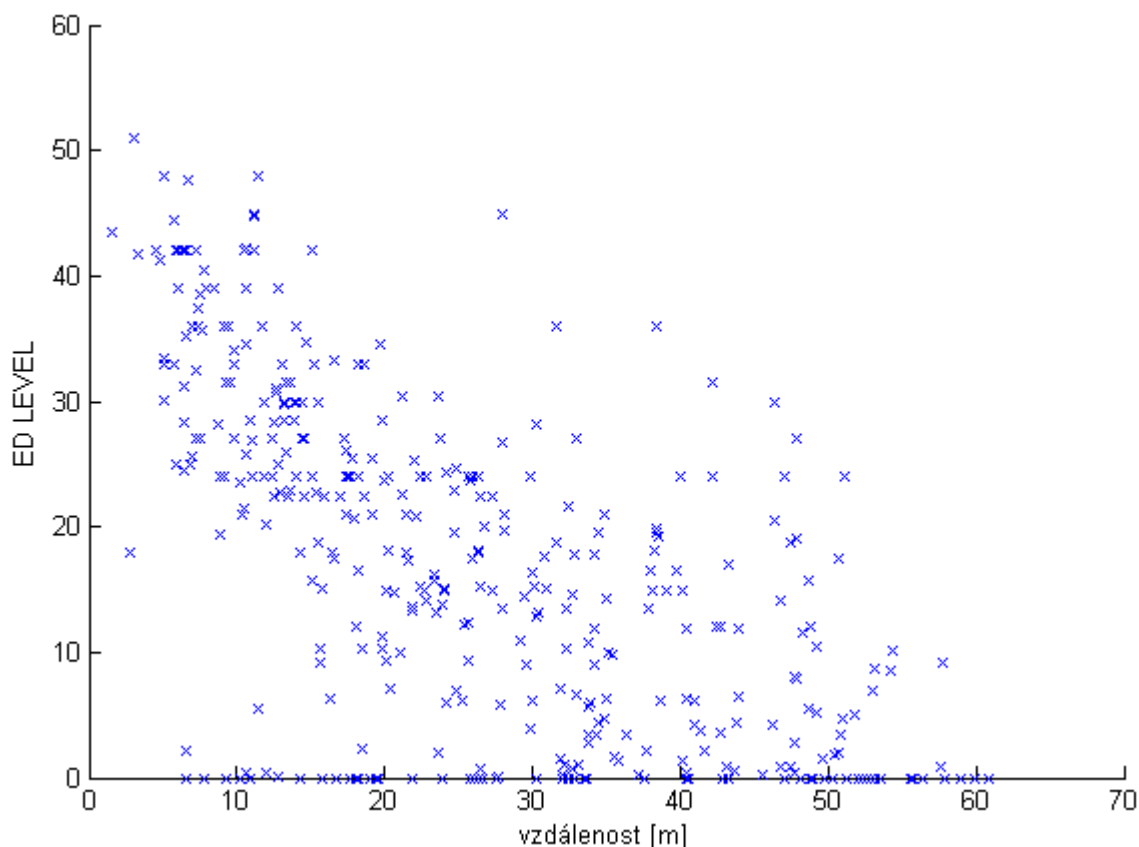
### 7.2.1 Volba výstupního výkonu

Během měření se v prostorách nenacházeli žádní pohybující se lidé, a proto nedocházelo k rušení signálu. Díky tomu nekolísala síla přijatého signálu a měření jednotlivých kotevních uzlů stačilo provést pouze desetkrát. Následně byly tyto hodnoty jednotlivých měření zprůměrovány. Měření proběhlo třikrát, pokaždé s jiným výstupním výkonem, a to s

- největším možným: 10 dBm,
- výchozím: 5 dBm
- a nejmenším: -11 dBm.

Pro jednotlivé výstupní výkony našel a naměřil pohyblivý uzel z 374 měření, tento počet kotevních uzlů:

- 237 uzlů pro výstupní výkon -11 dBm
- 306 uzlů pro výstupní výkon 5 dBm
- 320 uzlů pro výstupní výkon 10 dBm



**Obrázek 7.2** Závislost přijaté energie na vzdálenosti

Z důvodu největšího počtu naměřených dat pro největší výstupní výkon, bude lokalizační algoritmus počítat s těmito daty. Závislost těchto dat (ED LEVEL – energie přijatého signálu) na vzdálenosti, je zobrazena na obrázku 7.2. Energie přijatého signálu klesá s rostoucí vzdáleností.

### 7.2.2 Určení ztrátovosti prostředí

Z předchozí charakteristiky (obrázek 7.2) lze určit referenční hodnoty pro výpočet indexu ztrátovosti prostředí. Pro zaručení dostatečného počtu indexů ztrátovosti pro co největší počet naměřených hodnot, rozdělíme charakteristiku na několik oblastí.

**Tabulka 7.1** Přehled indexů ztrátovosti pro různé hodnoty energie přijatého signálu

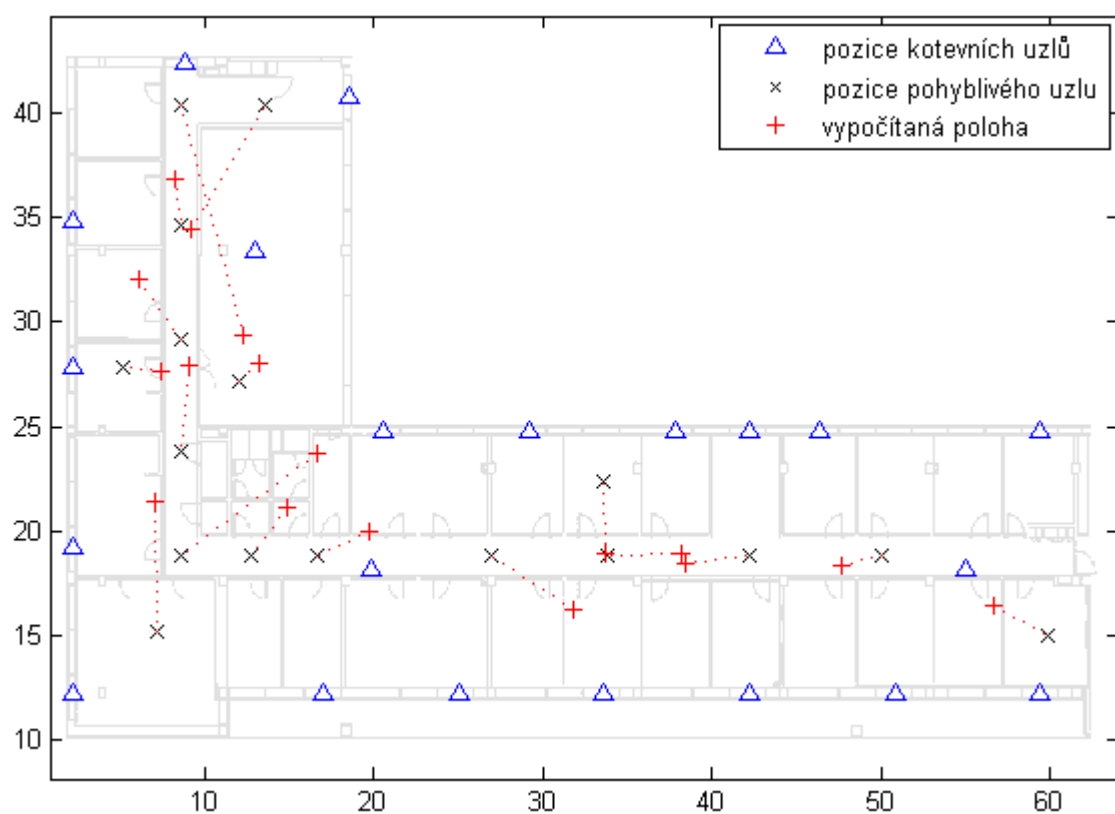
| ED LEVEL | $P_R$ [dBm] | d [m] | $\eta$ [-] |
|----------|-------------|-------|------------|
| 0–10     | -93.82      | 33.89 | 6.79       |
| 10–20    | -84.29      | 22.42 | 6.98       |
| 20–30    | -69.20      | 13.87 | 6.94       |
| 30–40    | -64.93      | 9.82  | 7.55       |
| 40–60    | -56.74      | 6.00  | 8.58       |

### 7.3 Lokalizace pomocí trilaterace

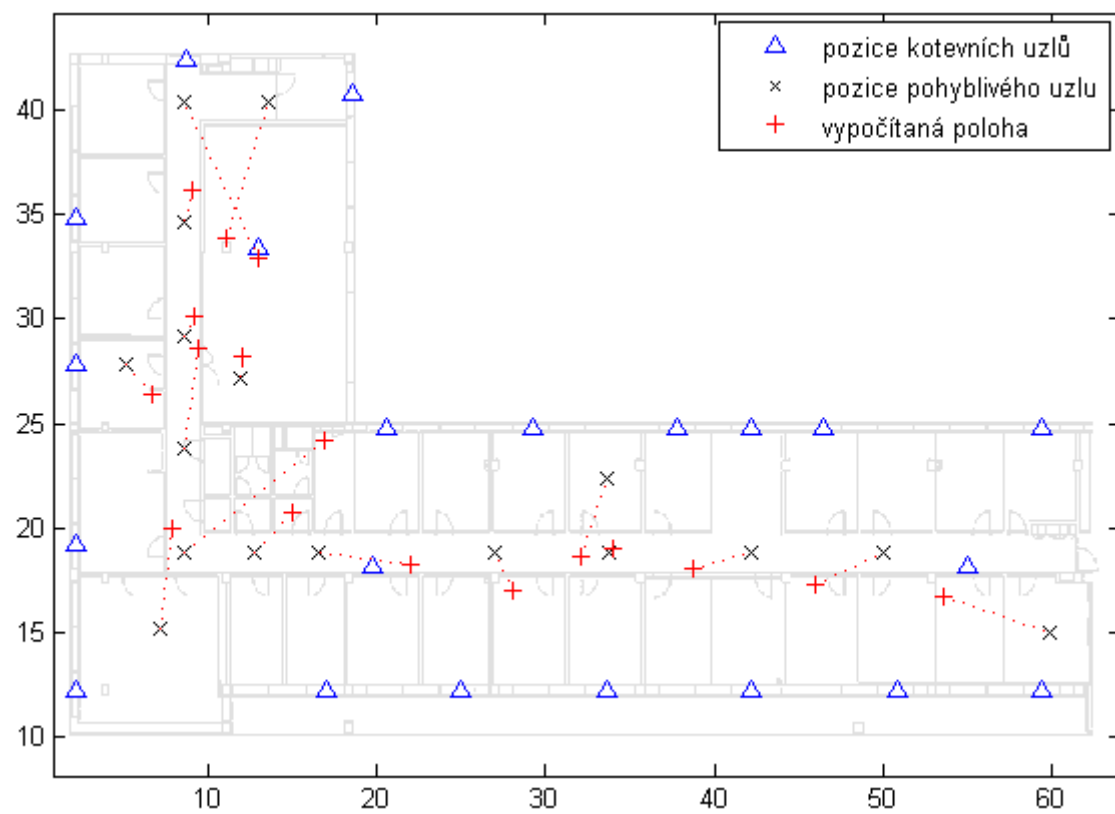
Veškeré výpočty metody trilaterace probíhaly v programu Matlab. K výpočtu jsou použity indexy ztrátovosti s tabulky 7.1. Algoritmus pro danou měřenou polohu provede výpočet pro všechny možné kombinace tří kotevních uzlů. Po dosazení do rovnice (4.6) algoritmus uloží vypočítané polohy. Následně se odfiltrují hodnoty, podle následujících kritérií:

- vypočítané hodnoty se nacházejí mimo prostory budovy
- součet naměřených hodnot přijaté energie přesáhne hodnotu, kterou může teoreticky měřená poloha dosáhnout
- hodnota přijaté energie je menší než 20, jelikož je z obrázku 7.2 patrné, že pro tyto hodnoty je rozsah vzdálenosti pro danou sílu přijatého signálu mnohem větší než pro ostatní

Dále se z odfiltrovaných poloh provede medián, aby výsledná hledaná pozice nebyla ovlivněná extrémními hodnotami. Výsledek vypočítaných poloh je zobrazen na obrázku 7.3 jako červené „+“.



**Obrázek 7.3** Výsledky lokalizace pomocí trilaterace



**Obrázek 7.4** Výsledky lokalizace pomocí eukleidovské propagační metody



## 7.4 Lokalizace pomocí eukleidovské propagační metody

Výpočet hledané polohy probíhá stejně jako u trilaterace s výjimkou počtu použitých kotevních uzlů. Pro eukleidovskou propagační metodu algoritmus počítá s dvěma naměřenými hodnotami a třetí dopočítá pomocí trigonometrie. Třetí kotevní uzel je využit pouze pro ověření umístění hledané pozice, protože při použití dvou kotevních uzlů dochází k zrcadlení, které je zobrazeno na obrázku 4.3. Filtrace vypočítaných hodnot a dvou kotevních uzlů byla provedena jako u trilaterace. Na obrázku 7.4 jsou zobrazeny nalezené pozice. Jsou reprezentovány červeným symbolem „+“.

## 7.5 Lokalizace pomocí trilaterace se zónovou filtrací

U předchozích dvou metod má velký vliv na konečný výsledek filtrace vypočtených hodnot. Zvolením správných filtračních zón, lze odstranit chybně nalezené pozice.

Filtrační zóna je oblast definující, které kombinace tří kotevních uzlů jsou schopny lokalizovat hledaný uzel z danou přesností. Použitím algoritmu zobrazeného na obrázku 7.5 byla vytvořená zónová mapa. Nevýhodou této metody je, že je potřeba mít dostatek kotevních uzlů. Pokud všechny kombinace kotevních uzlů dokážou určit polohu všech hledaných pozic, lze počet filtračních zón vypočítat podle následující rovnice (7.1).

$$Z_N = \frac{N_{KU} \cdot (N_{KU} - 1) \cdot (N_{KU} - 2)}{6} \quad (7.1)$$

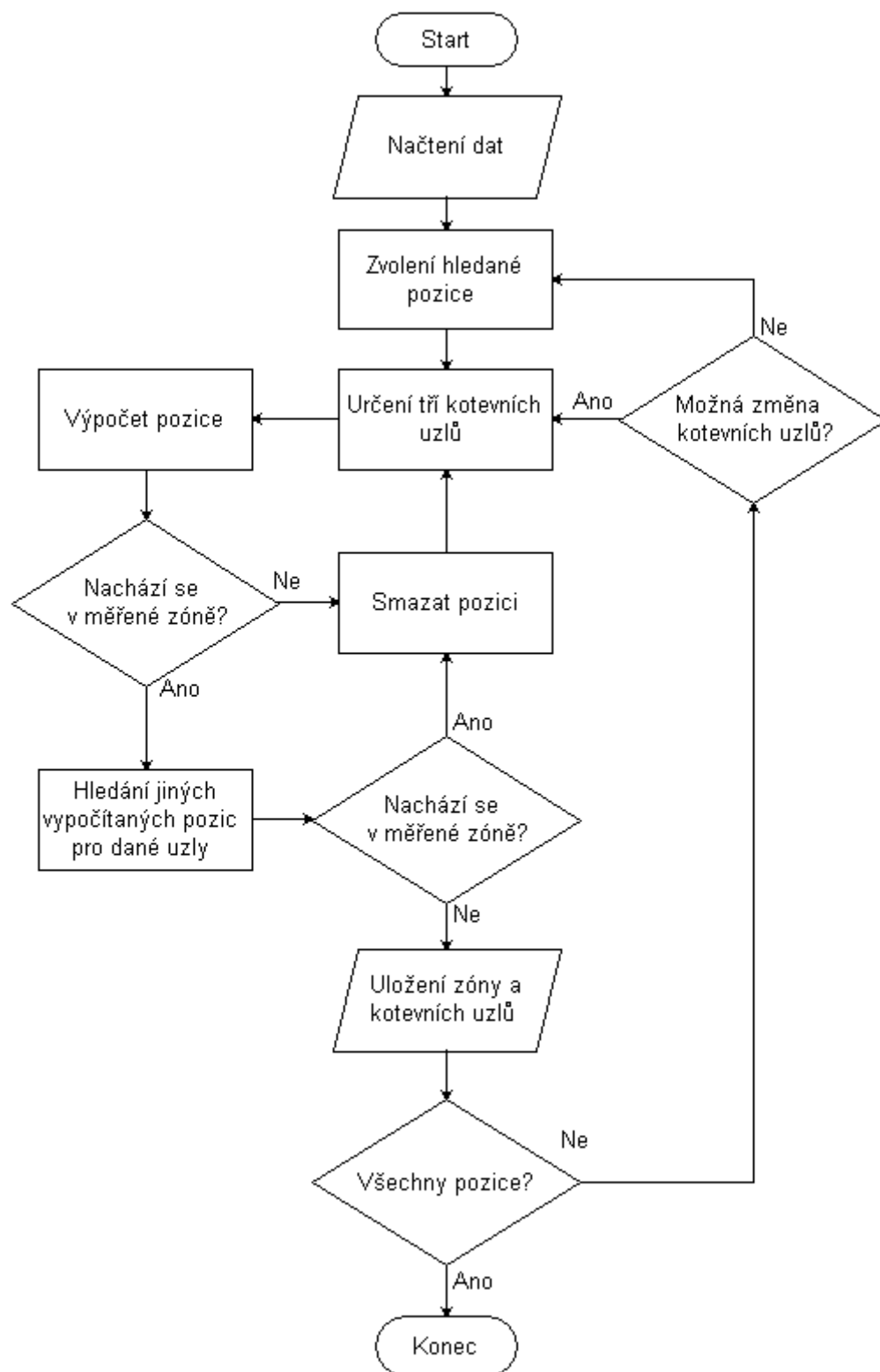
$Z_N$  – počet filtračních zón

$N_{KU}$  – počet kotevních uzlů

Z toho vyplývá, že maximální počet filtračních zón pro 22 kotevních uzlů je 1540. Ovšem v reálných podmínkách negativní vlivy jako: interference, změna prostředí, odrazy a další, dramaticky toto číslo snižující. Během měření v prostorách VUT na Kolejní 4 se ztrátovosti prostředí uvedenou v tabulce 7.1 a použitou lokalizační metodou trilaterace s maximální odchylkou nalezené polohy  $\pm 1,7$  metru na ose x i na ose y, bylo možné vytvořit pouze 217 kombinací kotevních uzlů.

### 7.5.1 Algoritmus pro vytvoření filtračních zón

Algoritmus pro každou změřenou pozici vytvoří oblast, v které určí jaké kotevní uzly jsou schopny s danou přesností vyhledat neznámou pozici pohyblivého uzlu. Vytvořené zóny s úspěšnými uzly uloží do souboru. Následně během lokalizace bude tento soubor načten pro filtraci vypočtených hodnot.



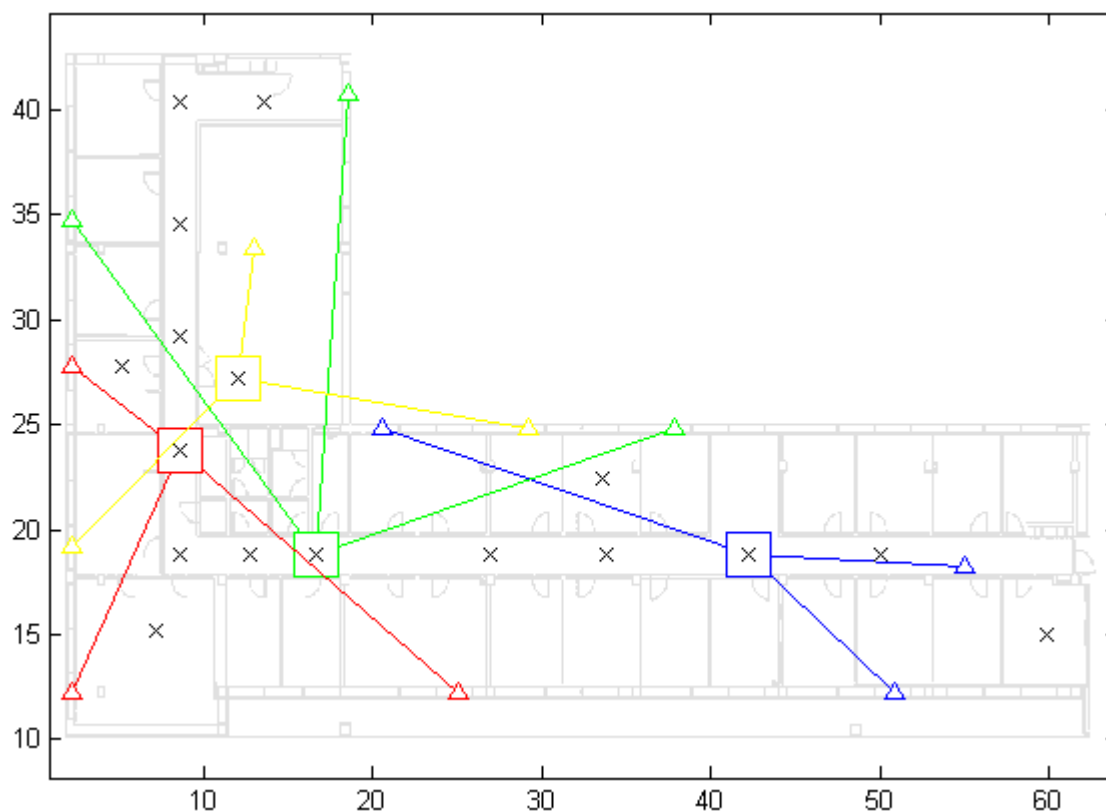
## 7.5.2 Ukázka filtračních zón

Na obrázku 7.6 jsou zobrazeny tři zóny s kotevními uzly. Uzly jedné barvy jsou uzly, které našly neznámou polohu s přesností  $\pm 1.7$  metru pro zónu stejné barvy. Pro vytvoření kompletní „mapy“ filtračních zón by bylo potřeba provést měření všech oblastí. Vytvořené zóny a příklady možných kombinací kotevních uzlů jsou zapsány v tabulce 7.2.

**Tabulka 7.2** Ukázka kombinací kotevních uzlů pro danou pozici

| Měřená pozice | Kombinace tří kotevních uzlů |    |    |
|---------------|------------------------------|----|----|
| 1             | 10                           | 20 | 22 |
| 2             | 13                           | 14 | 18 |
| 3             | 14                           | 15 | 17 |
| 4             | 13                           | 14 | 17 |
| 5             | 6                            | 14 | 17 |
| 6             | 3                            | 6  | 7  |
| 7             | 7                            | 8  | 17 |
| 8             | 3                            | 15 | 17 |
| 9             | 16                           | 18 | 21 |

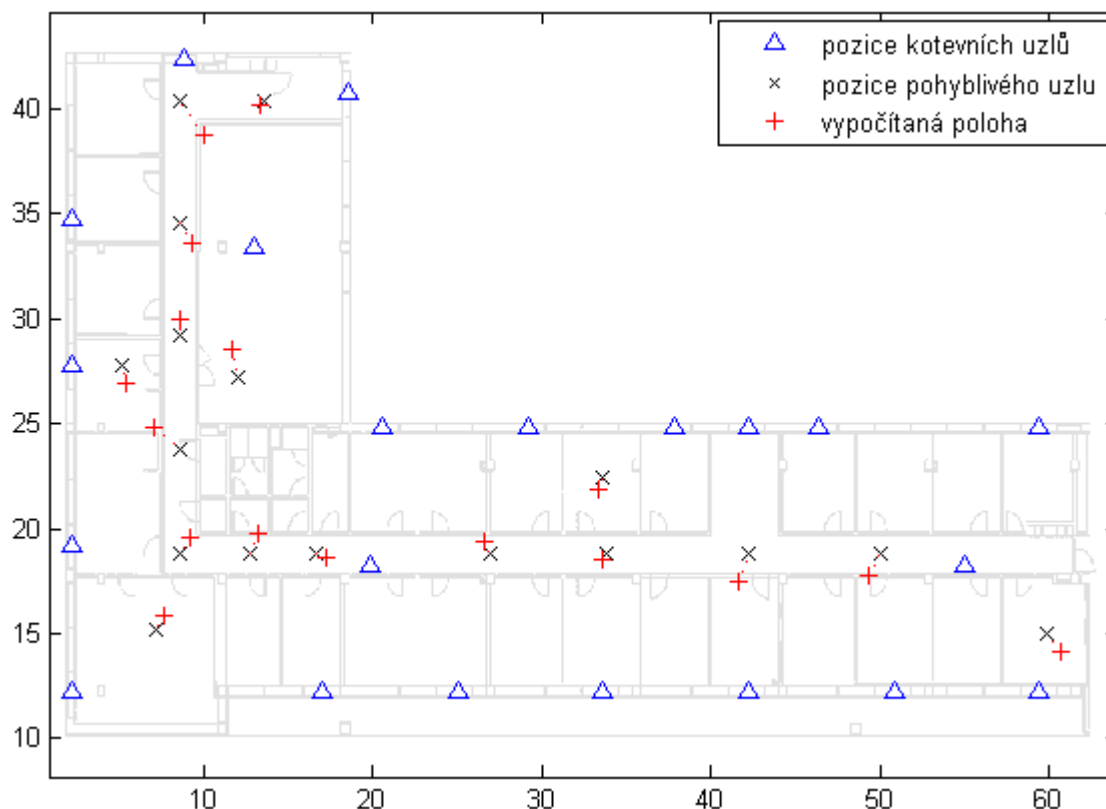
| Měřená pozice | Kombinace tří kotevních uzlů |    |    |
|---------------|------------------------------|----|----|
| 10            | 3                            | 6  | 7  |
| 11            | 6                            | 7  | 13 |
| 12            | 6                            | 9  | 10 |
| 13            | 10                           | 18 | 21 |
| 14            | 1                            | 3  | 6  |
| 15            | 1                            | 17 | 21 |
| 16            | 1                            | 10 | 13 |
| 17            | 14                           | 20 | 22 |



**Obrázek 7.6** Ukázka filtračních zón s kotevními uzly

## 7.6 Výsledky filtrace trilaterační metody

Nyní během trilaterace dochází k filtraci vypočítaných hodnot. Algoritmus vyhledá zónu, v které se nachází poloha nalezeného uzlu, a porovná zdali jsou kotevní uzly shodné s uzly uvedenými pro danou filtrační zónu. Pokud se shodují, jsou uloženy. Algoritmus poté pokračuje s vyhledáváním dalších možných kombinací tří kotevních uzlů. Nakonec se ze všech uložených hodnot hledané pozice určí medián. Výsledné polohy pohyblivého uzlu jsou zobrazeny na obrázku 7.7.



**Obrázek 7.7** Výsledky lokalizace pomocí trilaterace se zónovou filtrací

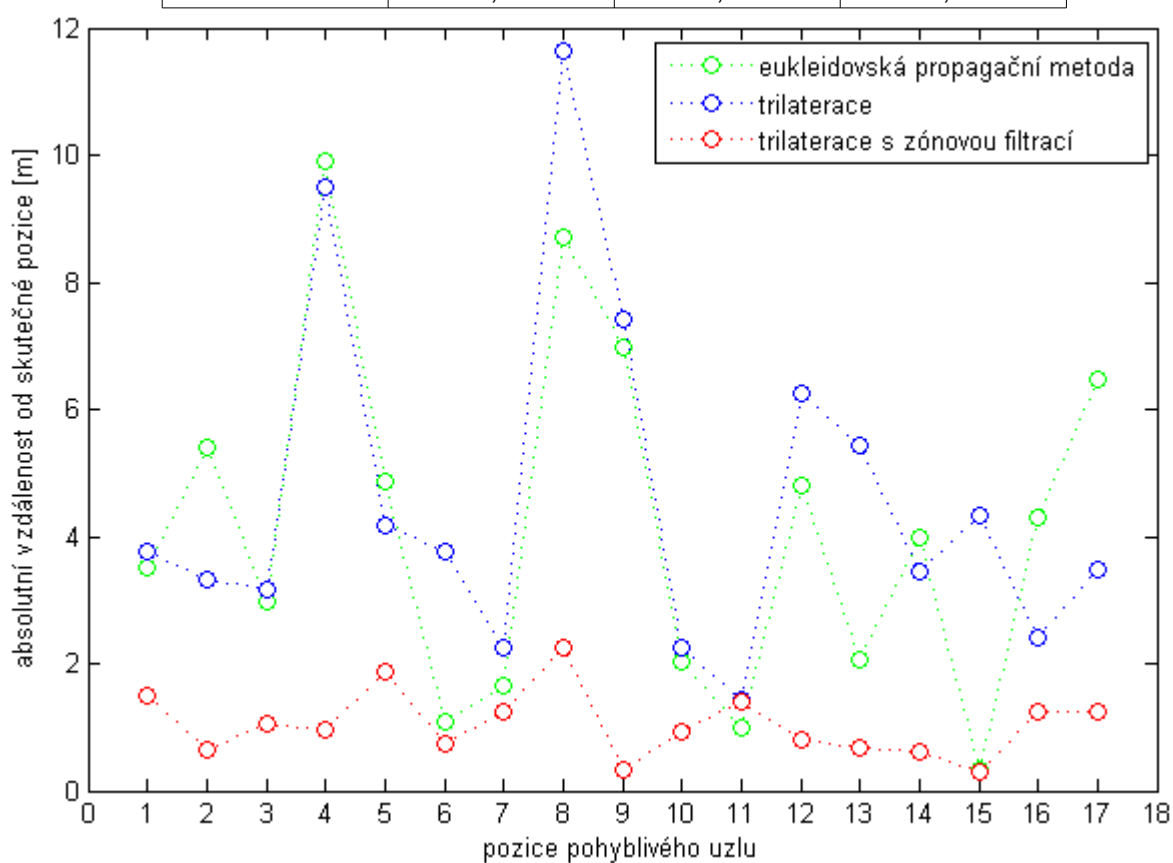
## 7.7 Porovnání použitých metod

Největší problém u trilaterace a eukleidovské propagační metody jsou krajní pozice 4, 8, 9, 12, 17, neboť vypočtené hledané pozice, které se nacházely mimo budovu, byly odfiltrovány. To znamená, že nalezené pozice s danou nepřesností byly smazány z jedné či dvou stran, ale ostatní nalezené pozice se stejnou nepřesností zůstaly. To mělo za následek odchýlení pozice ve směru do středu budovy.

U použité metody trilaterace se zónovou filtrací k tomuto problému nemůže dojít, protože filtrace je jasně dána velikostí filtrační zóny. Z výsledků na obrázku 7.8 je jasné, že zónová filtrace úspěšně odfiltrovala nežádoucí hodnoty a přispěla k přesnější lokalizaci.

**Tabulka 7.3** Přehled odchylek použitých metod pro měřené pozice

| Pozice | Trilaterace | Eukleidovská<br>propagační<br>metoda | Trilaterace<br>s zónovou<br>filtrací |
|--------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1      | 3,78        | 3,51                                 | 1,48                                 |
| 2      | 3,33        | 5,41                                 | 0,65                                 |
| 3      | 3,16        | 2,98                                 | 1,07                                 |
| 4      | 9,50        | 9,92                                 | 0,95                                 |
| 5      | 4,18        | 4,87                                 | 1,88                                 |
| 6      | 3,77        | 1,09                                 | 0,73                                 |
| 7      | 2,24        | 1,64                                 | 1,24                                 |
| 8      | 11,63       | 8,71                                 | 2,25                                 |
| 9      | 7,43        | 6,97                                 | 0,33                                 |
| 10     | 2,26        | 2,04                                 | 0,93                                 |
| 11     | 1,43        | 0,99                                 | 1,39                                 |
| 12     | 6,25        | 4,81                                 | 0,79                                 |
| 13     | 5,42        | 2,06                                 | 0,66                                 |
| 14     | 3,46        | 3,99                                 | 0,61                                 |
| 15     | 4,34        | 0,32                                 | 0,31                                 |
| 16     | 2,42        | 4,31                                 | 1,26                                 |
| 17     | 3,47        | 6,46                                 | 1,24                                 |



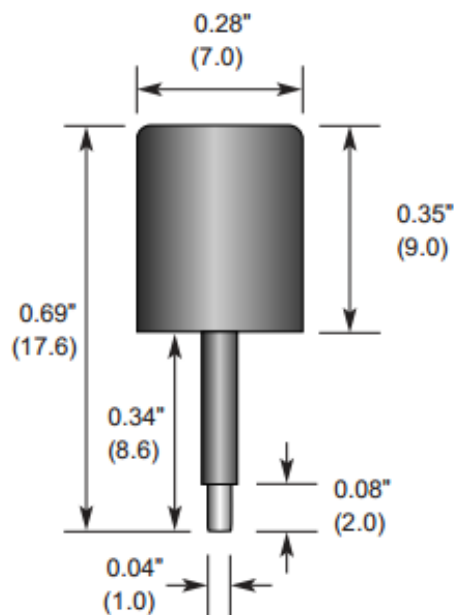
**Obrázek 7.8** Porovnání použitých metod

## 7.8 Porovnání použitých antén

Během experimentu byly použity tři druhy antén. Největší počet, a to 15 kusů, bylo antén ANT-868-JJB-ST (na obrázku 7.10). Tyto antény dosahují zesílení -1,33 dBi. Další anténa označená jako IQRF AN-01 na obrázku 7.11 dosahuje zesílení 1.2 dBi. Ty byly použity jenom dvě. A největší zesílení mělo pět antén ANT-8WHIP3H-SMA (obrázek 7.9), které činí 3dBi. Obrázky jsou převzaty s datasheetu výrobců.



Obrázek 7.11 Anténa IQRF AN-01



Obrázek 7.10 Anténa ANT-868-JJB-ST



Obrázek 7.9 Anténa ANT-8WHIP3H-SMA

Pro srovnání byly umístěny dva měřicí moduly s různými anténami na stejnou pozici kotevního uzlu. Konkrétně se jednalo o antény se zesílením -1,33 dBi a 3 dBi. Pohyblivý uzel neboli hledaný uzel využíval anténu se zesílením -1,33 dBi. Pomocí trilaterace se zónovou filtrací byl proveden test pro tuto kotevní pozici, díky které byly zjištěny tyto okolnosti:

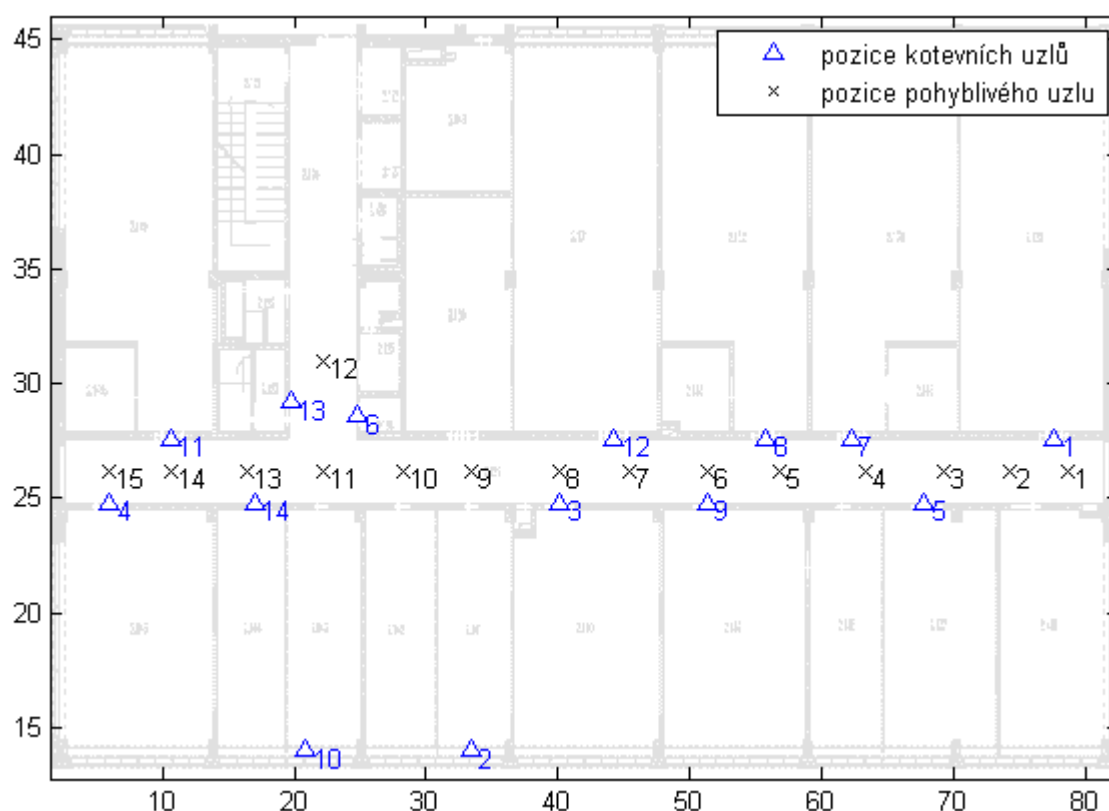
- Anténa se zesílením 3 dBi naměřila hodnoty pro všechny hledané pozice a úspěšně lokalizovala čtyři pozice
- Anténa se zesílením -1,33 dBi naměřila hodnoty pro 15 hledaných pozic což je o dvě méně než naměřila silnější anténa a úspěšně lokalizovala tři pozice

Z toho lze dedukovat, že pro lokalizaci pomocí trilaterace se zónovou filtrací nemá velký vliv výběr antén, ale počet kombinací kotevních uzlů. Vzájemná kombinace použitých antén a jejich polarizace nemá v budovách velký dopad na výsledek lokalizace.

## 7.9 Postup měření na Technické 12

Úkolem druhého měření bylo ověření lokalizace pomocí trilaterace se zónovou filtrací. Měření probíhalo v prostorách VUT v nové budově VUT na Technické 12 v druhém patře bloku E.

Během měření bylo použito 14 kotevních uzlů a jeden pohyblivý uzel. Kotevní uzly jsou znázorněny na obrázku 7.12 jako modré trojúhelníky. Byly přilepeny na střed dveří z venkovní strany ve výšce zhruba 156 cm, kromě dvou uzlů, které byly umístěny na parapetní desky ve výšce 95 cm. Pohyblivý uzel je znázorněn jako černé „x“ a byl umístěn ve výšce 120 cm. Tento uzel naměřil hodnoty pro 15 pozic, které jsou také zobrazeny na obrázku 7.12.



**Obrázek 7.12** Pozice pohyblivého a kotevních uzlů na Technické 12

Měření v těchto prostorách nebylo ovlivněno větším pohybem lidí, a tudíž stačilo provést měření pro každý kotevní uzel desetkrát a následně zprůměrovat. Měření už proběhlo pouze pro výstupní výkon 10 dBm.

### 7.9.1 Určení ztrátovosti prostředí a filtračních zón

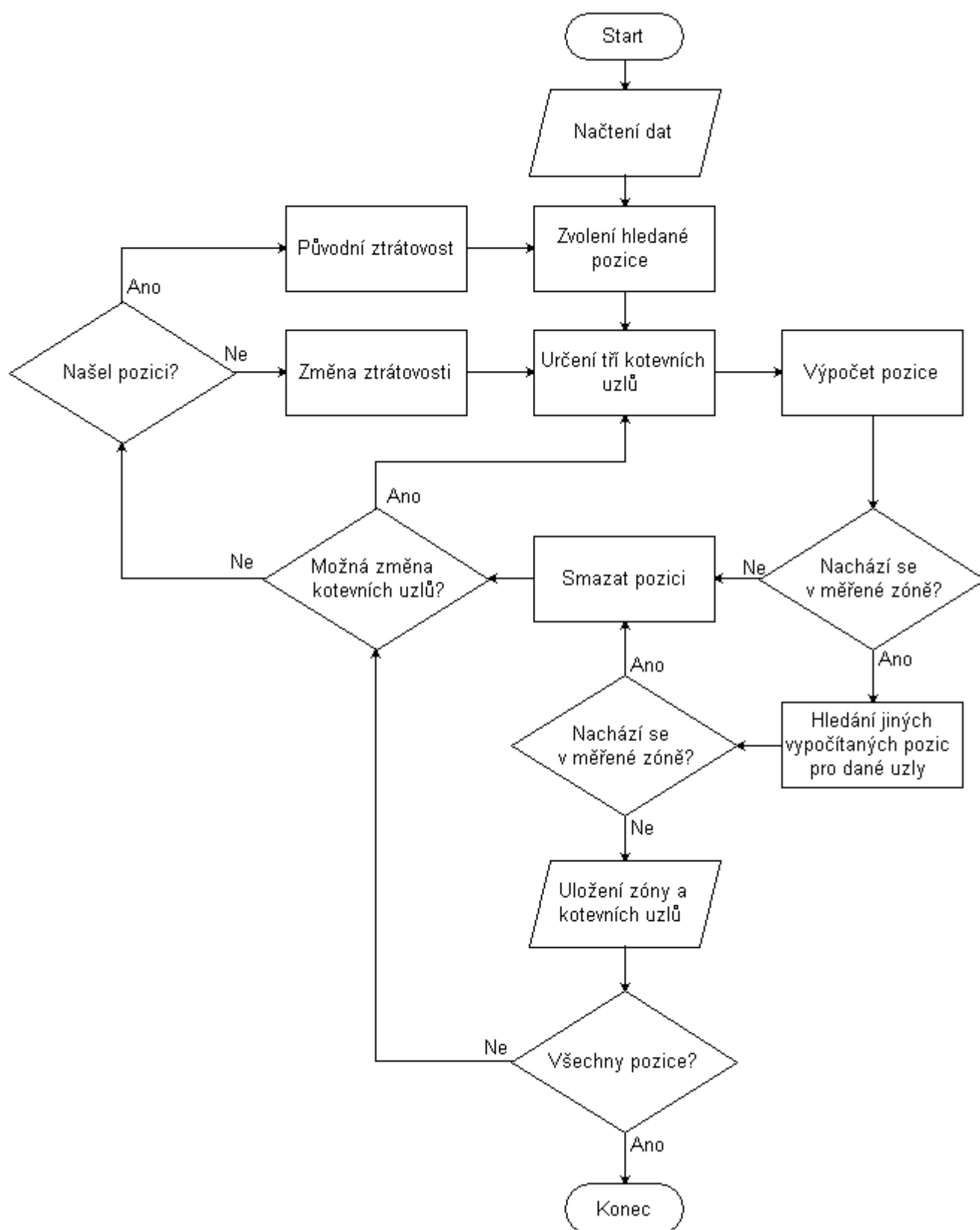
Z důvodu malého počtu a atypického rozmístění kotevních uzlů, je nutno určit dostatečné množství referenčních hodnot pro výpočet indexů ztrátovosti prostředí. Pro tento účel lze aplikovat algoritmus, který má za úkol vytvořit databázi potřebného počtu indexů ztrátovosti. Vývojový diagram tohoto algoritmu s výpočtem filtračních zón je zobrazen na obrázku 7.13.

Pro měření v prostorách VUT na Technické 12, algoritmus definoval ztrátovost pozicím 1, 2, 3 a 12. Díky tomu jsou pozice 1, 2 a 3 lokalizovány s velkou přesností. Používané referenční hodnoty ztrátovosti jsou zapsány v tabulce 7.4. Závislost přijaté energie na vzdálenosti všech kotevních uzlů měřených pozic je zobrazená na obrázku 7.14.

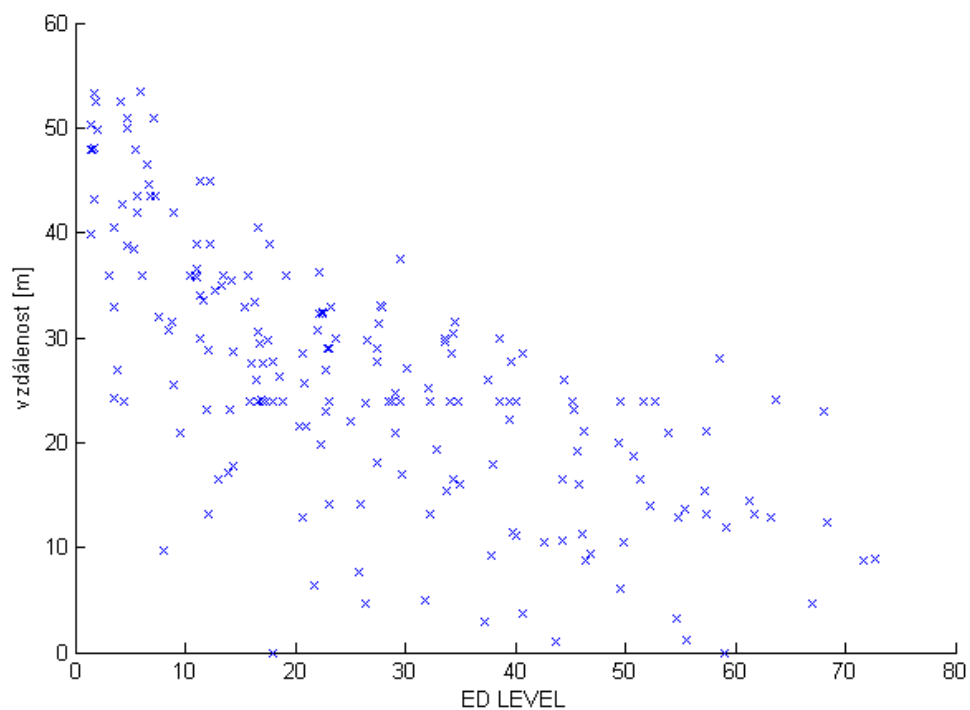
**Tabulka 7.4** Přehled referenčních hodnot ztrátovosti pro lokalizaci na Technické 12

| Pozice    | ED LEVEL | $P_R$ [dBm] | d [m] | $\eta$ [-] |
|-----------|----------|-------------|-------|------------|
| <b>1</b>  | 0–10     | -90,83      | 72,71 | 5,42       |
|           | 10–20    | -87,74      | 59,17 | 5,52       |
|           | 20–30    | -78,42      | 53,17 | 5,12       |
|           | 30–40    | -67,56      | 34,53 | 5,04       |
|           | 40–60    | -58,29      | 3,59  | 12,31      |
| <b>2</b>  | 0–10     | -96,60      | 54,68 | 6,13       |
|           | 10–20    | -86,82      | 54,87 | 5,57       |
|           | 20–30    | -72,14      | 30,13 | 5,55       |
|           | 30–40    | -68,43      | 8,52  | 8,43       |
|           | 40–60    | -54,11      | 6,65  | 7,79       |
| <b>3</b>  | 0–10     | -93,77      | 49,59 | 6,12       |
|           | 10–20    | -89,19      | 49,91 | 5,84       |
|           | 20–30    | -73,22      | 44,46 | 5,05       |
|           | 30–40    | -62,92      | 13,47 | 6,46       |
|           | 40–60    | -48,71      | 1,98  | 19,79      |
| <b>12</b> | 0–10     | -90,01      | 8,09  | 11,01      |
|           | 10–20    | -84,14      | 33,77 | 6,16       |
|           | 20–30    | -75,28      | 17,35 | 6,88       |
|           | 30–40    | -62,92      | 3,08  | 14,92      |
|           | 40–60    | -54,11      | 6,65  | 7,79       |





**Obrázek 7.13** Vývojový diagram algoritmu určení ztrátovosti a filtračních zón



**Obrázek 7.14** Závislost přijaté energie na vzdálenosti v prostorách VUT na Technické 12

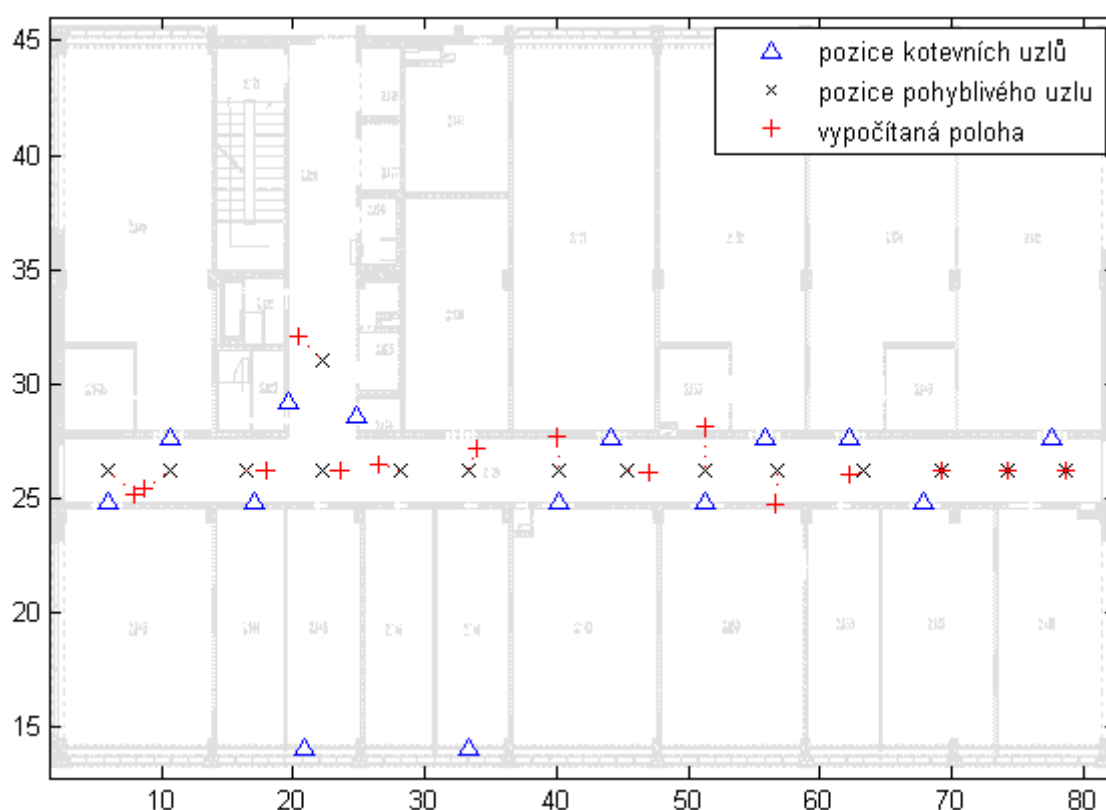
**Tabulka 7.5** Přehled kombinací kotevních uzlů pro jednotlivé ztrátovosti

| měřená<br>pozice | Kombinace tří kotevních uzlů pro:       |    |    |   |    |    |   |    |    |  |    |    |
|------------------|---|----|----|---|----|----|---|----|----|--|----|----|
|                  | první referenční<br>hodnoty ztrátovosti |    |    | druhé referenční<br>hodnoty ztrátovosti |    |    | třetí referenční<br>hodnoty ztrátovosti |    |    | čtvrté referenční<br>hodnoty ztrátovosti |    |    |
| 1                | 4                                       | 10 | 12 | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 2                | -                                       | -  | -  | 10                                      | 12 | 13 | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 3                | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | 8                                       | 10 | 13 | -  | -  | -  |
| 4                | -                                       | -  | -  | 1                                       | 10 | 13 | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 5                | 5                                       | 10 | 11 | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 6                | -                                       | -  | -  | 6                                       | 8  | 9  | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 7                | 1                                       | 10 | 14 | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 8                | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | 2                                       | 4  | 9  | -  | -  | -  |
| 9                | -                                       | -  | -  | 7                                       | 10 | 11 | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 10               | 4                                       | 8  | 11 | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 11               | -                                       | -  | -  | 1                                       | 10 | 11 | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 12               | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | 9  | 13 | 14 |
| 13               | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | 2  | 9  | 11 |
| 14               | 4                                       | 11 | 12 | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -  | -  | -  |
| 15               | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | -                                       | -  | -  | 4  | 6  | 10 |

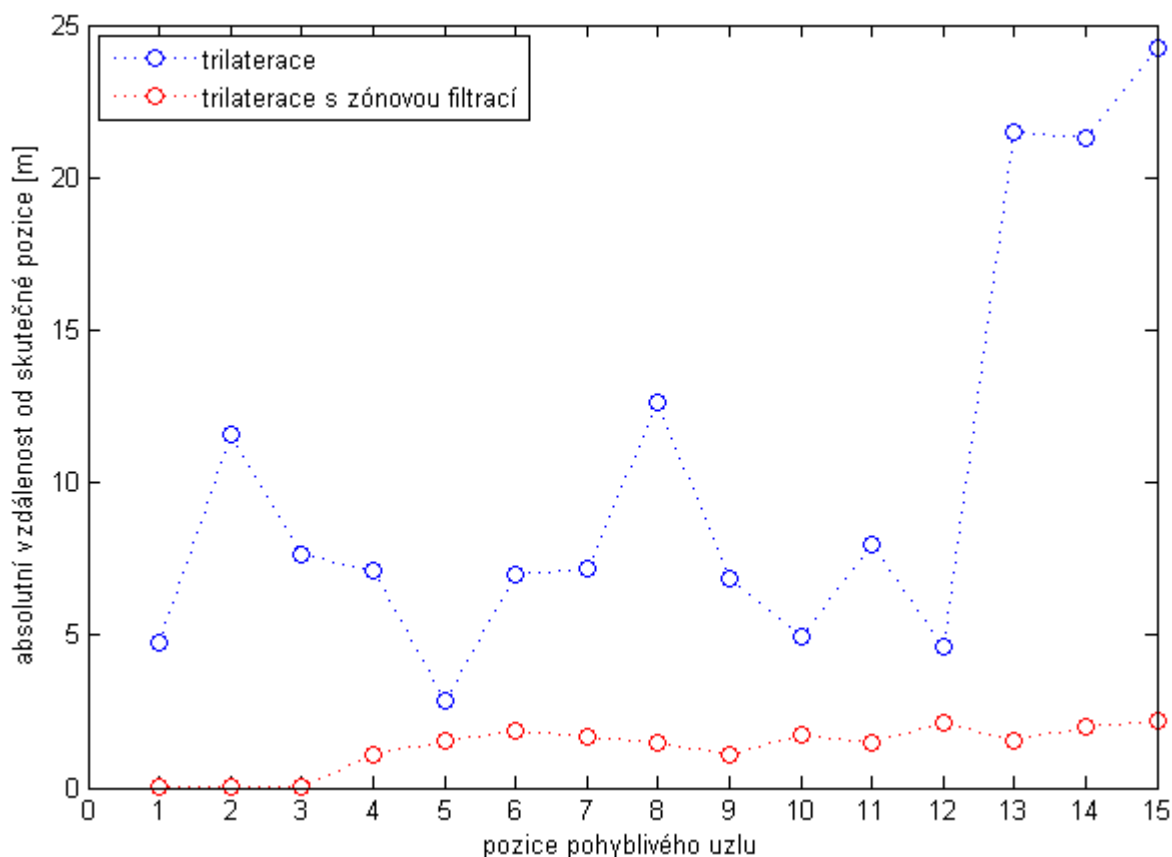
## 7.9.2 Výsledky měření na Technické 12

Druhé měření bylo zaměřené na ověření účinnosti lokalizační metody trilaterace se zónovou filtrací. Experiment probíhal stejně jako měření v prostorách VUT na Kolejní 4 s výjimkou nastavení referenčních hodnot ztrátovosti prostředí. Algoritmus nejprve vyhledal všechny polohy hledaného uzlu pro první pozici, a pokud nenašel žádnou takovou, která by byla uvnitř filtrační zóny, provedl změnu referenčních hodnot ztrátovosti prostředí a celý cyklus zopakoval. Následně algoritmus vykonal totéž pro další měřené pozice, které ještě nebyly nalezeny. Výsledky lokalizace jsou zobrazeny na obrázku 7.15. Pro srovnání je na obrázku 7.16 porovnání trilaterace pouze s filtrací hodnot, které se nacházejí v prostorách budovy a trilateraci se zónovou filtrací.

Filtrační zóny tohoto měření jsou zvoleny pro lokalizaci s přesností  $\pm 2$  metrů na ose x i na ose y. Pokud by se zvětšila přesnost, zvětšil by se i počet referenčních hodnot ztrátovosti prostředí.



**Obrázek 7.15** Výsledky lokalizace pomocí trilaterace se zónovou filtrací na Technické 12



**Obrázek 7.16** Srovnání přesnosti lokalizace pomocí trilaterace s a bez zónové filtrace

**Tabulka 7.6** Přehled odchylek mezi trilaterací s a bez zónové filtrace

| pozice                        | 1    | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     |
|-------------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| <b>trilaterace</b>            | 4,73 | 11,56 | 7,62 | 7,11 | 2,88 | 7,01 | 7,22 | 12,65 |
| <b>filtrovaná trilaterace</b> | 0,01 | 0,00  | 0,01 | 1,05 | 1,52 | 1,89 | 1,66 | 1,46  |

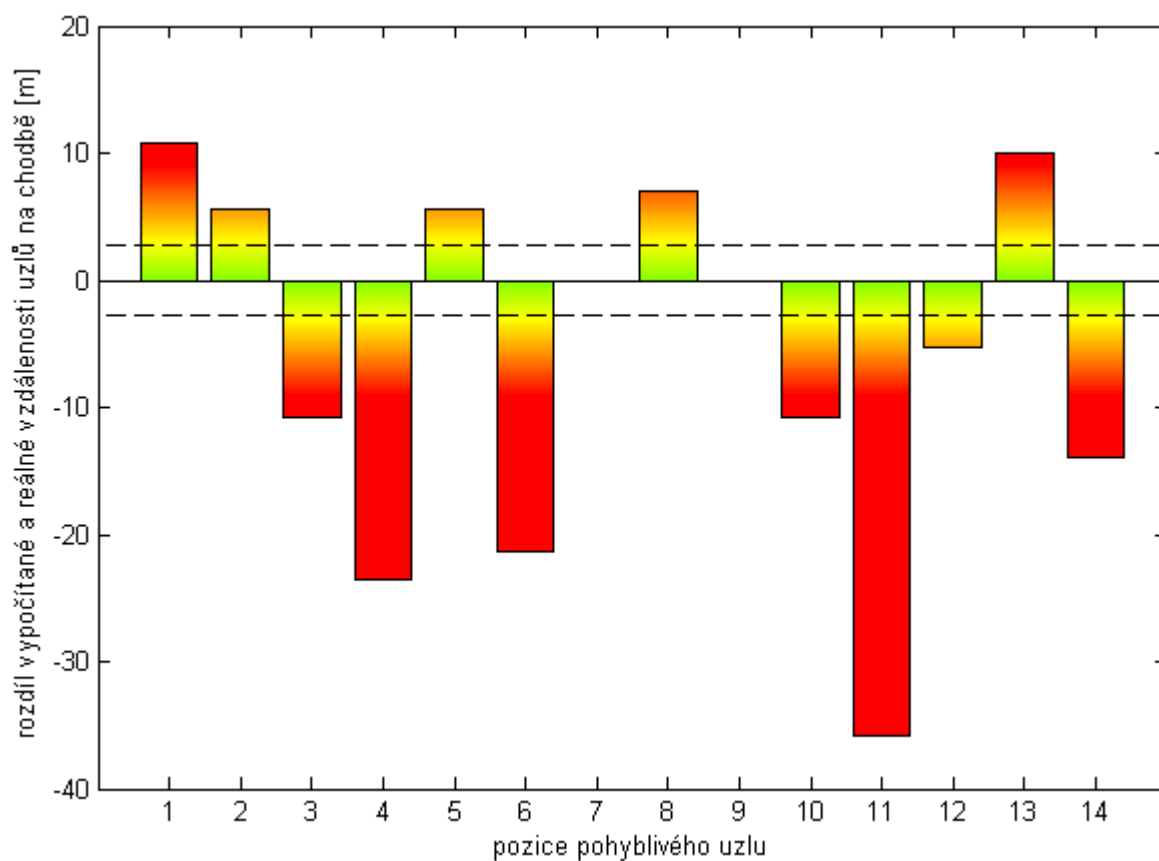
  

| pozice                        | 9    | 10   | 11   | 12   | 13    | 14    | 15    |
|-------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| <b>trilaterace</b>            | 6,87 | 4,98 | 7,96 | 4,64 | 21,50 | 21,29 | 24,23 |
| <b>filtrovaná trilaterace</b> | 1,08 | 1,74 | 1,46 | 2,10 | 1,54  | 2,02  | 2,22  |

Zásadním problémem lokalizace pro druhé měření bylo, že se většina kotevních uzlů nacházela na chodbě. Z toho důvodu signály uzlů na této chodbě byly značně ovlivněny negativními jevy (interference, odrazy...), a proto se index ztrátovosti prostředí jednotlivých uzlů radikálně lišil. Pro srovnání jsou v tabulce 7.7 zobrazeny rozdíly mezi reálnou  $d_r$  a vypočítanou  $d_v$  vzdáleností druhé měřené pozice a všech kotevních uzlů. Tyto rozdíly mezi vypočítanými a reálnými vzdálenostmi jsou také graficky znázorněny na obrázku 7.17. Vzdálenost byla spočítána pomocí referenční ztrátovosti prostředí uzlu číslo 9. Jelikož byla přesnost lokalizace nastavena na  $\pm 2$  metry na ose x a ose y, tzn. maximálně  $|2,8|$  metru, můžeme si všimnout, že pouze jeden z uzlů zobrazen v tabulce 7.7 tuto hodnotu nepřesahuje, a to uzel číslo 7.

**Tabulka 7.7** Ukázka rozdílu reálné a vypočtené vzdálenosti uzlů na chodbě

| uzel | $P_R$ [dBm] | $d_r$ [m] | $d_v$ [m] | $\Delta d$ [m] |
|------|-------------|-----------|-----------|----------------|
| 1    | -58,29      | 3,58      | 14,44     | 10,86          |
| 2    | -89,13      | 42,68     | 48,25     | 5,57           |
| 3    | -70,70      | 34,23     | 23,46     | -10,76         |
| 4    | -87,23      | 68,31     | 44,79     | -23,53         |
| 5    | -54,11      | 6,65      | 12,27     | 5,62           |
| 6    | -75,43      | 49,56     | 28,24     | -21,32         |
| 7    | -53,65      | 12,18     | 12,05     | -0,13          |
| 8    | -72,91      | 18,55     | 25,59     | 7,03           |
| 9    | -70,23      | 23,04     | 23,04     | 0,00           |
| 10   | -86,82      | 54,87     | 44,07     | -10,80         |
| 11   | -75,13      | 63,72     | 27,90     | -35,81         |
| 12   | -72,14      | 30,13     | 24,83     | -5,31          |
| 13   | -96,60      | 54,68     | 64,61     | 9,93           |
| 14   | -86,46      | 57,32     | 43,45     | -13,86         |



**Obrázek 7.17** Ukázka rozdílu reálné a vypočtené vzdálenosti uzlů na chodbě

Další nevýhodou rozložení kotevních uzlů v řadě je fakt, že determinant matice  $A$  (4.3) je nulový a nelze vytvořit inverzní matici. Taková matice se jmenuje singulární. Je potom nutné aplikovat pseudoinverzní matici. V praxi se nejčastěji používá Moore-Penroseovu pseudoinverzi. Další možností je aplikovat základní trigonometrii, zde je ale potřeba zadat upřesňující informaci, na které straně kotevních uzlů se hledaná pozice nachází.

Pro úspěšnou lokalizaci druhého měření byly nezbytné kotevní uzly: 2, 6, 10, 13. Jsou to uzly nacházející se mimo chodbu a většinou jsou to právě tyto uzly, které tvoří kombinace pro jednotlivé filtrační zóny (viz tabulka 7.5).

Z tohoto měření vyplývá, že rozmístěním uzlů lze ovlivnit nejen přesnost lokalizace respektive stálost indexu ztrátovosti, ale i počet možných kombinací kotevních uzlů.

## 8 ZÁVĚR

Práce se zabývá lokalizačními metodami bezdrátových senzorových sítí, pomocí měření síly přijatého signálu. Byla popsána problematika týkající se lokalizačních metod a měření parametru RSSI.

Pro zjištění vlivu použitých antén a použitých metod bylo provedeno měření na Kolejní 4 s využitím měřicího programu BDServis ver.78. Ze sedmnácti pozic byly naměřeny síly signálu pro různé výstupní výkony. Následně naměřené hodnoty byly zpracovány vytvořenými lokalizačními metodami v programu Matlab.

Navržená optimalizace lokalizační metody trilaterace pomocí filtračních zón umožňuje odfiltrovat chybně nalezené pozice. Z naměřených hodnot jsou automaticky odstraněny pozice, které se nenacházejí v měřené zóně a současně se odstraní ty kombinace lokalizačních kotevních uzlů, které pro danou měřicí zónu určily chybně nalezené pozice jiných měřených zón.

Pro zjištění vlivu rozmístění kotevních uzlů bylo provedeno měření na Technické 12. Toto měření probíhalo na dlouhé, úzké chodbě a kotevní uzly byly umístěny na vnějších stranách dveří. Z patnácti naměřených pozic bylo zjištěno, že index ztrátovosti prostředí v takovém rozmístění kotevních uzlů, se pro jednotlivé uzly velmi liší, a proto byl vytvořen algoritmus pro určení dostatečného počtu indexů ztrátovosti.

Z výsledků obou měření vyplývá, že lokalizační metody zaměřené na měření síly přijatého signálu, jsou velmi náchylné na velký počet chybně nalezených pozic. Dále bylo zjištěno, že pro lokalizaci trilaterační metodou se zónovou filtrací nemá velký vliv výběr antén, ale počet kombinací kotevních uzlů. Vzájemná kombinace použitých antén a jejich polarizace nemá v budovách velký dopad na výsledek lokalizace. Pro lokalizaci má ještě zásadní vliv rozmístění kotevních uzlů a to z důvodu rozdílných ztrátovosti prostředí či samotný fakt vycházející z konceptu fungování mnoha algoritmů. Například pro testovanou trilateraci či eukleidovskou propagační metodu není vhodné rozmisťovat uzly v řadách, protože kombinace těchto uzlů není schopná jednoznačně určit, na které straně kotevních uzlů se hledaná pozice nachází.

Experimenty byly ověřeny optimalizační algoritmy vytvořené pro lokalizační metodu trilaterace, ale bylo by ještě potřeba provést měření pro vytvoření kompletní mapy filtračních zón a otestovat funkčnost v provozních podmínkách.

# Literatura

- [1] MIEYEVILLE, Fabien, Mohamed ICHCHOU, Gérard SCORLETTI, David NAVARRO a Wan DU. Wireless sensor networks for active vibration control in automobile structures. *Smart Materials and Structures* [online]. 2012, roč. 21, č. 7, s. 13 [cit. 2013-04-28]. ISSN 0964-1726. DOI: 10.1088/0964-1726/21/7/075009. Dostupné z: [stacks.iop.org/SMS/21/075009](http://stacks.iop.org/SMS/21/075009)
- [2] ZANDL, Patrick. *Bezdrátové sítě WiFi: praktický průvodce*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2003, 190 s. ISBN 978-0-7381-5915-7.
- [3] BOTTA, Miroslav. *Optimalizace odhadu vzdálenosti v bezdrátové ad-hoc síti*. Brno, 2011. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40331](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40331). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Milan Šimek, Ph.D.
- [4] BLUMENTHAL, J., R. GROSSMANN a D. TIMMERMANN. *Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks* [online]. 2007 [cit. 2013-05-03]. ISBN 978-1-4244-0830-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4447528>
- [5] KANG, Jihoon, Daeyoung KIM a Youngsoo KIM. *RSS Self-calibration Protocol for WSN Localization* [online]. 2007 [cit. 2013-05-04]. ISBN 1-4244-0523-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4147056>
- [6] HE, Tian, Chengdu HUANG, Brian M. BLUM, John A. STANKOVIC a Tarek ABDELZAHER. Range-free localization schemes for large scale sensor networks. *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '03* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2003, s. 81-95 [cit. 2013-05-11]. DOI: 10.1145/938985.938995. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=938985.938995>
- [7] NICULESCU, Dragos a Badri NATH. *Ad Hoc Positioning System (APS): Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE* [online]. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001, 2926 - 2931 [cit. 2013-05-12]. DOI: 10.1109/GLOCOM.2001.965964. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=965964&isnumber=20836>
- [8] SHIH, Chia-Yen a Pedro José MARRÓN. COLA: Complexity-Reduced Trilateration Approach for 3D Localization in Wireless Sensor Networks. *2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications* [online]. IEEE, 2010, s. 24-32 [cit. 2013-05-12]. DOI: 10.1109/SENSORCOMM.2010.11. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5558044>
- [9] ATMEL. *AT86RF212 Datasheet*. 2012, 172 s. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8168.pdf>
- [10] IQRF. *AN-01 Antenna Data Sheet*. 2011, 3 s. Dostupné z: <http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=101>
- [11] ANTENNA FACTOR. *ANT-868-JJB-xx DATA SHEETS*. 2006, 3 s. Dostupné z: [http://www.simplesolutions-uk.com/files/ANT-868-JJB-ST\\_Datasheet.pdf](http://www.simplesolutions-uk.com/files/ANT-868-JJB-ST_Datasheet.pdf)
- [12] RF SOLUTIONS. *ANT-8WHIP3H-SMA Datasheet*. 1 s. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1696740.pdf>



## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 2.1 Klasické rozmístění WSN.....   | 9  |
| Obrázek 3.1 Blokové schéma 802.15.4.....   | 10 |
| Obrázek 3.2 Topologie bod-bod (P2P).....   | 11 |
| Obrázek 3.1 Hvězdicová topologie.....  | 11 |
| Obrázek 4.1 Princip algoritmu APIT.....  | 12 |
| Obrázek 4.2 Princip algoritmu DV-Hop.....  | 13 |
| Obrázek 4.3 Eukleidovská propagační metoda.....  | 14 |
| Obrázek 4.4 Princip určení neznáme pozice pomocí trilaterace.....                          | 15 |
| Obrázek 7.1 Pozice pohyblivého a kotevních uzlů.....                                       | 21 |
| Obrázek 7.2 Závislost přijaté energie na vzdálenosti.....                                  | 22 |
| Obrázek 7.4 Výsledky lokalizace pomocí eukleidovské propagační metody.....                 | 24 |
| Obrázek 7.3 Výsledky lokalizace pomocí trilaterace.....                                    | 24 |
| Obrázek 7.5 Vývojový diagram algoritmu pro vytvoření filtračních zón.....                  | 26 |
| Obrázek 7.6 Ukázka filtračních zón s kotevními uzly.....                                   | 27 |
| Obrázek 7.7 Výsledky lokalizace pomocí trilaterace se zónovou filtrací.....                | 28 |
| Obrázek 7.8 Porovnání použitých metod.....   | 29 |
| Obrázek 7.10 Anténa ANT-868-JJB-ST.....  | 30 |
| Obrázek 7.9 Anténa ANT-8WHIP3H-SMA.....  | 30 |
| Obrázek 7.11 Anténa IQRF AN-01.....  | 30 |
| Obrázek 7.12 Pozice pohyblivého a kotevních uzlů na Technické 12.....                      | 31 |
| Obrázek 7.13 Vývojový diagram algoritmu určení ztrátovosti a filtračních zón.....          | 33 |
| Obrázek 7.14 Závislost ED na vzdálenosti v prostorách VUT na Technické 12.....             | 34 |
| Obrázek 7.15 Výsledky lokalizace pomocí trilaterace se zón. filtr. na Technické 12.....    | 35 |
| Obrázek 7.16 Srovnání přesnosti lokalizace pomocí trilaterace s a bez zónové filtrace..... | 36 |
| Obrázek 7.17 Ukázka rozdílu reálné a vypočtené vzdálenosti uzlů na chodbě.....             | 37 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 7.1 Přehled indexů ztrátovosti pro různé hodnoty energie přijatého signálu.... | 23 |
| Tabulka 7.2 Přehled kombinací kotevních uzlů pro danou pozici.....                     | 27 |
| Tabulka 7.3 Přehled odchylek použitých metod pro měření pozice.....                    | 29 |
| Tabulka 7.4 Přehled referenčních hodnot ztrátovosti pro lokalizaci na Technické 12.... | 32 |
| Tabulka 7.5 Přehled kombinací kotevních uzlů pro jednotlivé ztrátovosti.....           | 34 |
| Tabulka 7.6 Přehled odchylek mezi trilaterací s a bez zónové filtrace.....             | 36 |
| Tabulka 7.7 Ukázka rozdílu reálné a vypočtené vzdálenosti uzlů na chodbě.....          | 37 |

## Seznam zkratek

- WSN** (Wireless Sensor Network) bezdrátové senzorové síť  
**MAC** (Medium Access Control) subvrstva vrstvy spojovací  
**PHY** (Physical layer) fyzická vrstva  
**ISM** (Industrial, Scientific, Medical) volná pásma pro rádiové vysílání  
**P2P** (peer-to-peer) doslova rovný s rovným  
**FFD** (Fully Functionality Devices) – zařízení s úplnou funkcionalitou  
**RFD** (Reduced Functionality Devices) – zařízení obsahující limitované funkce a možnosti  
**RSSI** (Received Signal Strength Indication) – indikátor výkonu přijatého signálu  
**APIT** (Approximate Point In Triangle) – orientační bod v trojúhelníku  
**DV-Hop** (Distance Vector Hop) – algoritmus vektoru vzdálenosti  
**TDoA** (Time Difference of Arrival) – výpočet založený na rozdílu mezi rychlostí šíření rádiového a ultrazvukového impulsu  
**ToA** (Time of Arrival) – metoda počítající s dobou, za kterou překoná cestu signálu od vysílače k přijímači.  
**AoA** (Angle of Arrival) – měření na základě úhlu dopadu signálu  
**ED** (Energy Detection) – energie přijatého signálu

## Seznam symbolů a veličin

- $P_R$  – vysílaný výkon [mW]  
 $P_T$  – přijímaný výkon [mW]  
 $G_T$  – zisk antény vysílače [–]  
 $G_R$  – zisk antény přijímače [–]  
 $\lambda$  – vlnová délka [m]  
 $P_R(d_0)$  – síla přijatého signálu v referenční vzdálenosti  $d_0$  [mW]  
 $P_R(d)$  – síla přijatého signálu ve vzdálenosti  $d$  [mW]  
 $\eta$  – koeficient ztrátovosti okolního prostředí [–]  
 $d$  – vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem [m]  
 $d_0$  – referenční vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem [m]  
 $c_i$  – korekce kotevního uzlu  $i$   
 $X_i, Y_i$  – souřadnice kotevního uzlu  $i$   
 $X_j, Y_j$  – souřadnice ostatních kotevních uzlů  
 $h_i$  – počet skoků k ostatním kotevním uzlům  
 $x, y$  – souřadnice hledaného uzlu  
 $x_n, y_n$  – souřadnice kotevních uzlů  
 $d_n$  – vzdálenosti mezi kotevními uzly a hledanou pozicí  
 $P_R$  – výkon přijatého signálu

$RSSI\_BASE\_VAL$  – minimální citlivost přijímače

$ED\_LEVEL$  – změřená hodnota uložená v registru  $PHY\_ED\_LEVEL$

$Z_N$  – počet filtračních zón

$N_{KU}$  – počet kotevních uzlů

## Seznam příloh

Příloha 1. CD s algoritmy použitými pro lokalizaci naměřených dat